

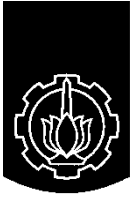
TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI KOORDINASI PROTEKSI DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN *ARC FLASH* PADA
PLTU PAITON UNIT 3**

Vania Aprilia Ukhti
NRP 2215105026

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiانتara, MT.
Ir. Arif Musthofa, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

**STUDI KOORDINASI PROTEKSI DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN *ARC FLASH* PADA
PLTU PAITON UNIT 3**

Vania Aprilia Ukhti
NRP 2215105026

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Ir. Arif Musthofa, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE141599

***STUDY OF PROTECTION COORDINATION WITH
CONSIDERING ARC FLASH IN COAL FIRED POWER PLANT
OF PAITON UNIT 3***

Vania Aprilia Ukhti
NRP 2215105026

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Ir. Arif Musthofa, MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty Of Electro Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **Studi Koordinasi Proteksi Dengan Mempertimbangkan Arc Flash Pada PLTU Paiton Unit 3**, adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017



Vania Aprilia Ukhti
Nrp. 2215105026

**STUDI KOORDINASI PROTEKSI
MEMPERTIMBANGKAN ARC FLASH PADA PLTU
PAITON UNIT 3**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

NIP: 196603181990101001

Ir. Arif Musthofa, MT.

NIP: 196608111992031004



STUDI KOORDINASI PROTEKSI MEMPERTIMBANGKAN ARC FLASH PADA PLTU PAITON UNIT 3

Nama Mahasiswa : Vania Aprilia Ukhti
Nrp : 2215105026
Dosen Pembimbing 1 : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
NIP : 196603181990101001
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Arif Musthofa, MT.
NIP : 196608111992031004

ABSTRAK

PLTU Paiton Unit 3 merupakan salah satu proyek percepatan pembangunan pembangkit listrik tahap 2 dengan kapasitas 1x815 MW net yang berbahan bakar batu bara. Untuk menjadikan sistem kelistrikan Jawa-Bali tunggal dan terpadu, maka pembangkit tersebut tersambung dengan saluran transmisi 500 kV. Oleh karena itu, koordinasi proteksi PLTU Paiton Unit 3 memiliki peran yang sangat penting untuk mengatasi gangguan agar tidak terjadi *black out* dan menjamin kontinuitas baik untuk pelayanan terhadap konsumen maupun pelayanan untuk pemakaian sendiri.

Setelah melakukan koordinasi proteksi, energi yang dihasilkan oleh busur api juga harus dipertimbangkan agar tidak melampaui standar yang diizinkan. Analisa busur api dilakukan dengan menggunakan perhitungan standar IEEE 1584-2002 untuk menentukan besarnya insiden energi dan menentukan batas keamanan untuk para pekerja serta menentukan *Personal Protective Equipment* (PPE) sesuai level insiden energi busur api dengan standar NFPA 70E-2009.

Hasil dari tugas akhir ini adalah setelah dilakukan *resetting* koordinasi proteksi dari kondisi *existing* PLTU Paiton Unit 3 baik untuk gangguan fasa atau gangguan ke tanah serta penambahan rele diferensial, nilai insiden energi busur api dan nilai *Flash Protection Boundary* (FPB) menurun yang semula ada mencapai level diluar level 4 ($>40 \text{ cal/cm}^2$), level 4 ($25.1 - 40 \text{ cal/cm}^2$), dan level 3 ($8.1 - 25 \text{ cal/cm}^2$) besarnya level *arc flash* menjadi level 3 ($8.1 - 25 \text{ cal/cm}^2$), level 2 ($4.1 - 8 \text{ cal/cm}^2$), dan level 0 ($0 - 1.2 \text{ cal/cm}^2$), oleh karena itu *Personal Protective Equipment* (PPE) dapat ditentukan sesuai level *arc flash* tiap bus sesuai NFPA 70E-2009.

Kata Kunci : Busur Api, PLTU Paiton Unit 3, Koordinasi Proteksi.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

**STUDY OF PROTECTION COORDINATION WITH
CONSIDERING ARC FLASH IN COAL FIRED POWER PLANT
OF PAITON UNIT 3**

Name : Vania Aprilia Ukhti
Nrp : 2215105026
Advisor 1 : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
NIP : 196603181990101001
Advisor 2 : Ir. Arif Musthofa, MT.
NIP : 196608111992031004

ABSTRACT

Paiton unit 3 Coal fire steam power plant is one of speeding project power plant development phase 2. The capacity of Coal fire steam power plant is 1x815 MW. To combining electricity of Jawa-Bali, Paiton unit 3 connected with 500 kV line. Because of the reason, protection coordination is very important. Beside of the reason, Protection coordination can solve blackout and guarantee a continuity to consumer as well household using.

After do protection coordination, arc flash will producing an energy so the issue will be use as considering to make the standart level. Arc flash analysis will be done using IEEE 1584-200 standart to determine the level of energy incident, safety level of workers and suitable Personal Protective Equipment (PPE) with standart of NFPA 70E-2009.

The result of this final project is protection coordinaton from existing condition Paiton unit 3 Coal fire steam power plant from phase, ground and differential relay, the level arc flash energy incident and Flash Protection Boundary could decrease. First, there is arc flash level more than 4 ($>40 \text{ cal/cm}^2$), level 4 ($25.1 - 40 \text{ cal/cm}^2$), and level 3 ($8.1 - 25 \text{ cal/cm}^2$) becoming level 3 ($8.1 - 25 \text{ cal/cm}^2$), level 2 ($4.1 - 8 \text{ cal/cm}^2$), and level 0 ($0 - 1.2 \text{ cal/cm}^2$). Because of the analysis, Personal Protective Equipment (PPE) could be determine the appropriate arc flash level every bus like NFPA 70E-2009 standart.

Keywords : arc flash , Paiton unit 3 Coal fire steam power plant , protection coordination

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

KATA PENGANTAR

Dengan mengucap puji syukur atas kehadiran Allah SWT, serta shalawat dan salam sentiasa terlimpahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul :

“Studi Koordinasi Proteksi Dengan Mempertimbangkan Arc Flash Pada PLTU Paiton Unit 3”

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu :

1. Kedua orang tua tercinta dan keluarga yang telah memberikan dorongan semangat baik moral maupun material.
2. Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. dan Ir. Arif Musthofa, MT. sebagai dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan perhatiannya dalam Tugas Akhir ini.
3. Seluruh dosen yang telah memberikan ilmunya selama kuliah, karyawan, dan keluarga besar Jurusan Teknik Elektro ITS yang tidak bisa disebutkan satu per satu.
4. Hidayatul Jihad atas dukungan, doa, semangat, dan perhatian yang terus menerus diberikan.
5. Alm. Tri Yoga Utomo, S.AB. yang telah memberikan motifasi untuk meraih gelar S.T. dari A.Md..
6. Aprillia Intan Kusumawati, Fidya Eka Prahesti, Avonthea Sisna, Shofia Kholisatus Sa’adah, Imam Suri Tauladan, Ilham Rosyadi, Putu Erlangga Putra, Wahyu Kurniawan, dan seluruh teman – teman Lintas Jalur angkatan 2015, serta teman-teman D3 TE UM 2012 yang banyak membantu dan selalu memberikan semangat.
7. Seluruh pihak yang belum bisa penulis sebutkan satu per satu yang ikut membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat menambah ilmu dan wawasan bagi para pembaca. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran demi penyempurnaan di masa yang akan datang.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

--Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR ISI

JUDUL

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK v

ABSTRACT vii

KATA PENGANTAR..... ix

DAFTAR ISI..... xi

DAFTAR GAMBAR..... xv

DAFTAR TABEL xvii

BAB I PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang.....	1
1.2	Rumusan Masalah	1
1.3	Batasan Masalah	2
1.4	Tujuan.....	2
1.5	Metodelogi.....	2
1.6	Sistematika Penulisan	3
1.7	Relevansi	4

BAB II SISTEM PENGAMAN TENAGA LISTRIK DAN ENERGI BUSUR API

2.1	Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik	5
2.1.1	Gangguan Hubung Singkat	6
2.1.1.1	Gangguan Hubung Singkat Simetri	6
2.1.1.2	Gangguan Hubung Singkat Asimetri	7
2.1.1.2.1	Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah....	8
2.1.1.2.2	Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa.....	8
2.1.1.2.3	Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah...	9
2.1.2	Gangguan Beban Lebih	10
2.2	Sistem Pengaman Tenaga Listrik	10
2.2.1	Rele Arus Lebih [2].....	12
2.2.1.1	Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (<i>inverse</i>).....	13
2.2.1.2	Rele Arus Lebih Waktu Terbatas (<i>definite</i>)	16
2.2.1.3	Rele Arus Lebih Waktu Seketika (<i>instantaneous</i>).....	17
2.2.2	Rele Diferensial.....	18
2.3	Busur Api	19
2.3.1	Perhitungan Busur Api	21

2.3.2	Jarak Aman Perlindungan (<i>Flash Protection Boundary</i>) ...23
2.4	Pengelompokan Kategori Energi Busur Api dengan Perlengkapan Keselamatan Diri Sesuai Standar NFPA 70E-200925

BAB III SISTEM KELISTRIKAN PLTU PAITON UNIT 3

3.1	Sistem Kelistrikan PLTU Paiton Unit 331
3.2	Kapasitas Pembangkitan PLTU Paiton Unit 332
3.3	Data Beban PLTU Paiton Unit 333

BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISA KOORDINASI PROTEKSI DAN BUSUR API PADA PLTU PAITON UNIT 3

4.1	Pemodelan Sistem Kelistrikan PLTU Paiton Unit 335
4.2	Pemilihan Tipikal Koordinasi Pada PLTU Paiton Unit 335
4.3	Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat.....36
4.3.1	Arus Hubung Singkat Maksimum.....37
4.3.2	Arus Hubung Singkat Minimum.....40
4.4	Studi Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa.....41
4.4.1	Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 141
4.4.2	Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 260
4.4.3	Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 380
4.5	Studi Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Ke Tanah.....97
4.5.1	Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Ke Tanah Tipikal 197
4.5.2	Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Ke Tanah Tipikal 2105
4.5.3	Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Ke Tanah Tipikal 3115
4.6	Perhitungan Energi Busur Api Dengan Standar IEEE 1584-2002.....122
4.6.1	Perhitungan Energi Busur Api Kondisi Existing123
4.6.2	Perhitungan Energi Busur Api Kondisi Resetting.....129
4.7	Perbandingan Besar Energi Busur Api Kondisi <i>Existing</i> Dengan Kondisi <i>Resetting</i>136
4.8	Perhitungan Busur Api Setelah Resetting Menggunakan Rele Diferensial138
4.9	Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> (FPB)144
4.9.1	Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> (FPB) Kondisi <i>Existing</i>145

4.9.2 Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> (FPB) Kondisi <i>Resetting</i>	146
4.10 Perhitungan Flash Protection Boundary Dengan Menggunakan Rele Diferensial	149
4.11 Personal Protective Equipment (PPE) yang Harus Digunakan	152
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan.....	159
5.2 Saran	159
DAFTAR PUSTAKA	161
BIODATA PENULIS	

--Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa	7
Gambar 2. 2	Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah	8
Gambar 2. 3	Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa	9
Gambar 2. 4	Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah	9
Gambar 2. 5	Skema Konsep Kerja Rele	11
Gambar 2. 6	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (<i>Inverse</i>).....	15
Gambar 2. 7	Karakteristik Kombinasi Rele Arus Lebih Waktu Terbalik Dengan Rele Arus Lebih Waktu Seketika	16
Gambar 2. 8	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu	17
Gambar 2. 9	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika	18
Gambar 2. 10	Perbedaan <i>Arc Fault</i> dengan <i>Bolted Fault</i>	19
Gambar 2. 11	Ledakan Busur Api Menyebabkan Kerusakan Oleh Api, Logam Cair, dan Panas.....	20
Gambar 2. 12	Pendekatan Batasan yang Mengatur Jarak Pekerja Dengan Peralatan Bertegangan Berdasarkan Tingkat Resiko	24
Gambar 3.1	Sistem Kelistrikan Tegangan Menengah PLTU Paiton Unit 3.....	32
Gambar 4. 1	Tipikal pada PLTU Paiton Unit 3.....	36
Gambar 4. 2	(a) Tipikal 1A (b) Tipikal 1B.....	44
Gambar 4. 3	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 1A	45
Gambar 4. 4	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 1B	46
Gambar 4. 5	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 1A	53
Gambar 4. 6	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle</i> Tipikal 1A.....	54
Gambar 4. 7	<i>Sequence Viewer 30 Cycle</i> Tipikal 1A.....	54
Gambar 4. 8	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 1B	56
Gambar 4. 9	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle</i> Tipikal 1B.....	57
Gambar 4. 10	<i>Sequence Viewer 30 Cycle</i> Tipikal 1B.....	57
Gambar 4. 11	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle</i> Tipikal 1.....	59
Gambar 4. 12	<i>Sequence Viewer 30 Cycle</i> Tipikal 1.....	59
Gambar 4. 13	(a) Tipikal 2A (b) Tipikal 2B.....	63
Gambar 4. 14	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 2A	64
Gambar 4. 15	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 2B	65
Gambar 4. 16	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 2A	72
Gambar 4. 17	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle</i> Tipikal 2A (<i>Case 1</i>)	73

Gambar 4. 18	<i>Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 2A (Case 1)</i>	73
Gambar 4. 19	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle Tipikal 2A (Case 2)</i>	74
Gambar 4. 20	<i>Sequence Viewer 30 Cycle (Case 2)</i>	74
Gambar 4. 21	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 2B	76
Gambar 4. 22	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle Tipikal 2B</i>	77
Gambar 4. 23	<i>Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 2B</i>	77
Gambar 4. 24	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle Tipikal 2</i>	79
Gambar 4. 25	<i>Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 2</i>	79
Gambar 4. 26	(a) Tipikal 3A (b) Tipikal 3B	82
Gambar 4. 27	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 3A.....	83
Gambar 4. 28	Plot Kurva Pengaman <i>Existing</i> Tipikal 3B.....	84
Gambar 4. 29	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 3A.....	89
Gambar 4. 30	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle Tipikal 3A</i>	90
Gambar 4. 31	<i>Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 3B</i>	90
Gambar 4. 32	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 3B	93
Gambar 4. 33	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle Tipikal 3B</i>	94
Gambar 4. 34	<i>Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 3B</i>	94
Gambar 4. 35	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle Tipikal 3</i>	95
Gambar 4. 36	<i>Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 3</i>	96
Gambar 4. 37	Tipikal 1 Rele <i>Ground Fault</i>	98
Gambar 4. 38	Plot Kurva Pengaman Kondisi <i>Existing</i> Tipikal 1	99
Gambar 4. 39	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 1	103
Gambar 4. 40	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle Tipikal 1</i>	104
Gambar 4. 41	<i>Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 1</i>	104
Gambar 4. 42	Tipikal 2 Rele <i>Ground Fault</i>	107
Gambar 4. 43	Plot Kurva Pengaman Kondisi <i>Existing</i> Tipikal 2	108
Gambar 4. 44	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 2.....	112
Gambar 4. 45	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle Tipikal 2 Case 1</i>	113
Gambar 4. 46	<i>Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 2 Case 1</i>	113
Gambar 4. 47	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle Tipikal 2 Case 2</i>	113
Gambar 4. 48	<i>Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 2 Case 2</i>	114
Gambar 4. 49	Tipikal 3 Rele <i>Ground Fault</i>	116
Gambar 4. 50	Plot Kurva Pengaman Kondisi <i>Existing</i> Tipikal 3	117
Gambar 4. 51	Plot Kurva Pengaman <i>Resetting</i> Tipikal 3.....	120
Gambar 4. 52	<i>Sequence Viewer 0.5 Cycle Tipikal 3</i>	121
Gambar 4. 53	<i>Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 3</i>	121

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Tabel Koefisien Kurva Rele <i>Invers</i>	14
Tabel 2. 2	Tabel Data Jarak Celah Bus (Jarak Bus)	22
Tabel 2. 3	Tabel Data Parameter-Paremeter yang Dibutuhkan Untuk Perhitungan Insiden Energi.....	23
Tabel 2. 4	Klasifikasi Alat Perlindungan Diri Dan Contoh Pakaian Pelindung	26
Tabel 2. 5	Standar NFPA 70E - 2009.....	29
Tabel 3. 1	Data Kapasitas Pembangkit dan Transormator Pada PLTU Paiton Unit 3.....	33
Tabel 3. 2	Data Beban Motor PLTU Paiton Unit 3	33
Tabel 4. 1	Data Arus Hubung Singkat Maksimum.....	37
Tabel 4. 2	Data Arus Hubung Singkat Minimum.....	40
Tabel 4. 3	Data <i>Existing</i> Rele Tipikal 1A dan 1B	42
Tabel 4. 4	Data <i>Resetting</i> Rele Tipikal 1A dan 1B.....	57
Tabel 4. 5	Urutan Sensing Tipikal 1	59
Tabel 4. 6	Data <i>Existing</i> Rele Tipikal 2A dan 2B	60
Tabel 4. 7	Data <i>Resetting</i> Rele Tipikal 2A dan 2B.....	77
Tabel 4. 8	Urutan Sensing Rele Tipikal 2	79
Tabel 4. 9	Data <i>Existing</i> Rele Tipikal 3A dan 3B	80
Tabel 4. 10	Data <i>Resetting</i> Rele Tipikal 3A dan 3B.....	94
Tabel 4. 11	Urutan Sensing Tipikal 3	96
Tabel 4. 12	Data <i>Existing</i> Rele <i>Ground</i> Tipikal 1	97
Tabel 4. 13	Data <i>Resetting</i> Rele <i>Ground</i> Tipikal 1	105
Tabel 4. 14	Urutan Sensing Tipikal 1 <i>Ground Fault</i>	105
Tabel 4. 15	Data <i>Existing</i> Rele <i>Ground</i> Tipikal 2	106
Tabel 4. 16	Data <i>Resetting</i> Rele <i>Ground</i> Tipikal 2	114
Tabel 4. 17	Urutan Sensing Tipikal 2 <i>Ground Fault</i>	115
Tabel 4. 18	Data <i>Existing</i> Rele <i>Ground</i> Tipikal 3	115
Tabel 4. 19	Data <i>Resetting</i> Rele <i>Ground</i> Tipikal 3	121
Tabel 4. 20	Urutan Sensing Tipikal 3 <i>Ground Fault</i>	122
Tabel 4. 21	Data Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi <i>Existing</i>	123
Tabel 4. 22	Data Hasil Perbandingan Perhitungan Manual dengan Simulasi Energi Busur Api Kondisi <i>Existing</i>	127

Tabel 4. 23	Data Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi <i>Resetting</i>	129
Tabel 4. 24	Data Hasil Perbandingan Perhitungan Manual dengan Simulasi Energi Busur Api Kondisi <i>Resetting</i> ...	134
Tabel 4. 25	Perbandingan Besar Energi Busur Api Kondisi <i>Existing</i> dengan Kondisi <i>Resetting</i>	136
Tabel 4.26	Hasil Simulasi Energi Busur Api Setelah Penambahan Rele Diferensial di PLTU Paiton Unit 3	138
Tabel 4.27	Hasil <i>Setting</i> Busur Api Setelah Penambahan Rele Diferensial Pada PLTU Paiton Unit 3	143
Tabel 4.28	Data Perbandingan FPB Kondisi Eksisting dan <i>Resetting</i>	148
Tabel 4.29	Hasil <i>Setting Flash Protection Boundary</i> Setelah Menggunakan Rele Diferensial	150
Tabel 4. 30	Jenis PPE Berdasarkan Kategori Busur Api Kondisi <i>Resetting</i>	152
Tabel 4. 31	Pelabelan Kategori Insiden Busur Api Tiap Bus.....	156

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PLTU Paiton Unit 3 merupakan salah satu proyek percepatan pembangunan pembangkit listrik tahap 2 dengan kapasitas 1x815 MW net yang berbahan bakar batu bara. Untuk menjadikan sistem kelistrikan Jawa-Bali tunggal dan terpadu, maka pembangkit tersebut tersambung dengan saluran transmisi 500 kV. Dengan kapasitas yang besar, maka pembangkit tersebut sangat berpengaruh terhadap sistem kelistrikan maupun permintaan beban di daerah Jawa-Bali, sehingga dibutuhkan keandalan dan kontinuitas yang sangat tinggi. Namun, gangguan pada sistem tenaga listrik mungkin saja terjadi pada sistem tenaga listrik yang baik sekalipun. Pada saat terjadi gangguan, beberapa akibat akan muncul dan semuanya itu akan menyebabkan kerugian bagi pembangkit tersebut. Salah satu faktor yang juga ikut dihitung dalam penentuan setting sistem proteksi pada sebuah plant adalah adanya bahaya *arc flash* atau busur api yang sering dilupakan oleh instalatir lapangan.

Arc flash merupakan fenomena percikan api sebagai akibat adanya arus hubung singkat pada sistem tenaga listrik. Arc flash ini akan muncul di lokasi terjadinya hubung singkat. Busur api ini sangat berbahaya apabila tidak diperhitungkan pada sistem proteksi tenaga listrik, akibat yang ditimbulkan oleh busur api bisa merusak peralatan bahkan bisa membahayakan keselamatan dan nyawa dari pekerja. Sehingga dengan melakukan perhitungan *arc flash* dan *incident energy* akan diketahui level energi bahaya *arc-flash* yang mungkin terjadi pada sistem, agar pemilihan peralatan pengaman dapat diperhitungkan untuk mengurangi level bahaya energi *arc-flash* tersebut. Selain itu, studi kasus koordinasi proteksi mempertimbangkan *arc flash* pada PLTU Paiton Unit 3 ini belum pernah dibahas sebagai topik tugas akhir.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana arus hubung singkat pada PLTU Paiton Unit 3 ?
2. Bagaimana koordinasi proteksi rele arus lebih pada PLTU Paiton Unit 3 pada kondisi awal?

3. Bagaimana *personal protection equipment* (PPE) yang akan digunakan pekerja berdasarkan dari energi *arc flash* yang dihasilkan setelah melakukan resetting koordinasi proteksi pada PLTU Paiton Unit 3 ?

1.3 Batasan Masalah

Pengerjaan tugas akhir ini memerlukan beberapa batasan masalah untuk lebih memfokuskan penyelesaian permasalahan, batasan masalah tersebut adalah sebagai berikut

1. Perhitungan besar energi busur api pada bus tegangan menengah, yaitu tegangan 13,8 KV dan 6,9 KV.
2. Analisa difokuskan pada koordinasi proteksi rele arus lebih fasa dan *ground fault*.
3. Perhitungan energi *arc-flash* sesuai standar IEEE 1584-2002.
4. Pengelompokkan kategori energi busur api dengan perlengkapan keselamatan diri menggunakan standart NFPA 70E – 2009.

1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

1. Mensimulasikan dan menganalisis sistem kelistrikan PLTU Paiton Unit 3 untuk mengetahui arus hubung singkat maksimal dan minimal pada tiap bus *existing*,
2. Mensimulasikan dan menganalisis sistem kelistrikan PLTU Paiton Unit 3 untuk mengetahui koordinasi proteksi kondisi *existing*,
3. Melakukan *resetting* koordinasi rele pengaman arus lebih fasa dan *ground fault* rele untuk mendapatkan kategori level insiden energi busur api sehingga dapat ditentukan jenis dari perlindungan diri yang harus digunakan dan dapat menentukan jarak aman pekerja untuk meminimalisir resiko luka bakar akibat energi busur api.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan Data dan Studi Literatur

Hal yang dilakukan pertama kali adalah pengumpulan data dan studi literatur untuk menambah pemahaman mengenai permasalahan yang dihadapi. Data yang diperlukan adalah *rating* generator, trafo, kabel, motor, kapasitas busbar dan *single line diagram* PLTU Paiton Unit 3. Literatur yang digunakan berupa beberapa buku, jurnal ilmiah, serta *user manual* peralatan.

2. Pemodelan dan Simulasi

Penulis melakukan pemodelan dengan menggunakan *software* simulasi ETAP 12.6.0. Dalam tugas akhir ini dilakukan pemodelan *single line diagram* pada *software* simulasi. Selanjutnya dilakukan simulasi hubung singkat. Tujuan dilakukan pemodelan dan simulasi ini agar dapat diketahui besarnya daya yang mengalir ke beban dan arus hubung singkat yang terjadi pada sistem kelistrikan PLTU Paiton Unit 3.

3. Analisis

Analisa hubung singkat dilakukan untuk mengetahui besarnya arus hubung singkat maksimum dan minimum. Kemudian akan digunakan untuk melakukan studi koordinasi proteksi dan menganalisa dan memperbaiki setting koordinasi proteksi apabila belum sesuai. selanjutnya studi busur api dengan melihat besarnya insiden energy dan waktu pemutusan CB berdasarkan setting koordinasi proteksi.

4. Kesimpulan

Langkah akhir dari penyusunan tugas akhir ini adalah pembuatan kesimpulan dari hasil analisis dan simulasi yang telah dilakukan. Selain itu juga akan diberikan saran dan rekomendasi tentang penelitian yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Tugas akhir ini dibagi dalam lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I : Pendahuluan

Bab ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi pengerjaan tugas akhir, sistematika pembahasan dan relevansi dari penulis

BAB II : Sistem Pengaman Tenaga Listrik dan Energi Busur Api

Bab ini menjelaskan teori-teori penunjang yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini, seperti gangguan hubung singkat yang terjadi pada sistem kelistrikan, penjelasan tentang sistem pengaman. Kemudian akan dibahas tentang energi busur api sesuai standar IEEE 1584-2002, serta perlengkapan perlindungan diri sesuai NFPA 70E.

BAB III : Sistem Kelistrikan PLTU Paiton Unit 3

Bab ini menjelaskan mengenai sistem kelistrikan yang ada pada PLTU Paiton Unit 3

BAB IV : Hasil Simulasi Dan Analisa Koordinasi Proteksi Dan Busur Api Pada PLTU Paiton Unit 3

Bab ini membahas mengenai koordinasi proteksi baik kondisi eksisting dan perhitungan resetting, kemudian menghitung flash *protection boundary* agar mendapatkan jarak batas dimana seseorang menggunakan alat pelindung diri yang tepat sesuai level energi busur api.

BAB V : Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari keseluruhan pembahasan yang telah dilakukan dari tugas akhir.

1.7 Relevansi

Penulisan tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Dapat menjadi referensi bagi PLTU Paiton Unit 3 dalam penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) yang tepat sesuai energi level busur api.
2. Menjadi referensi untuk penelitian berikutnya ketika dibutuhkan informasi tentang besarnya insiden *arc-flash* dengan metode modifikasi perhitungan.

BAB II

SISTEM PENGAMAN TENAGA LISTRIK DAN ENERGI BUSUR API

2.1 Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik

Dewasa ini kebutuhan listrik sangat meningkat pesat seiring dengan perkembangan teknologi yang tidak terbatas. Untuk melayani kebutuhan masyarakat tersebut, maka dibutuhkan keandalan dan kontinuitas tinggi pada sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik tersebut terdiri dari unit-unit pembangkit yang terhubung langsung dengan saluran transmisi untuk melayani kebutuhan beban tersebut, baik kebutuhan rumah tangga, mall, hotel, instansi, hingga industri. Namun, pada prakteknya, dalam proses penyaluran listrik tersebut selalu terjadi gangguan, baik sementara maupun permanen. Gangguan tersebut adalah ketidaknormalan dalam sistem tenaga listrik yang menyebabkan mengalirnya arus yang tidak seimbang dalam sistem tiga fasa[1]. Gangguan dapat juga dikatakan sebagai semua kecacatan yang mengganggu aliran normal arus ke beban, sehingga menyebabkan kondisi pada sistem tenaga listrik tidak normal[1].

Berdasarkan asalnya, terdapat dua macam gangguan yaitu[2]:

1. Gangguan berasal dari dalam sistem[2]

Penyebab gangguan yang berasal dari dalam sistem antara lain disebabkan oleh kesalahan mekanis yaitu terjadi karena proses penuaan atau karena kerusakan material seperti kawat putus, isolator pecah, retaknya bearing, dll, Pemasangan yang kurang baik, tegangan dan arus tidak normal pada sistem serta beban yang melebihi kapasitas sistem.

2. Gangguan berasal dari luar sistem[2]

Gangguan yang berasal dari luar sistem antara lain pengaruh cuaca seperti hujan, angin, serta surja petir, pengaruh lingkungan antara lain pohon tumbang, benda asing jatuh, dan juga akibat kecerobohan manusia. Pada gangguan surja petir dapat menyebabkan gangguan hubung singkat karena tembus pada isolasi peralatan (breakdown).

Berdasarkan sifat gangguan, maka jenis gangguan pada sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi 2 yaitu[2]:

1. Gangguan sementara (*temporary*)[2]

Menunjukkan gangguan yang dapat hilang dengan sendirinya atau pada bagian yang terganggu diputus secara sesaat dari sumber tegangannya.

2. Gangguan permanen (*stationary*)[2]

Menunjukkan gangguan yang tidak hilang atau tetap ada apabila pemutus tenaga telah terbuka. Untuk menghilangkan gangguan permanen diperlukan tindakan perbaikan pada titik penyebab gangguan tersebut.

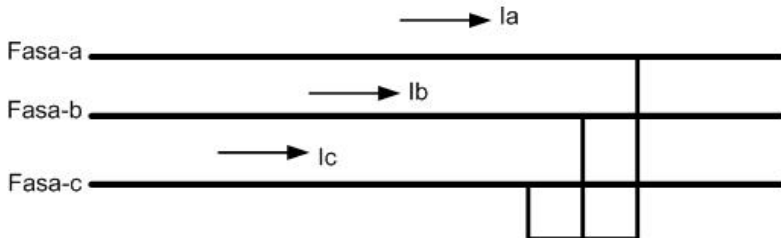
2.1.1 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat adalah salah satu penyebab gangguan pada sistem tenaga listrik. Gangguan ini terjadi karena adanya saluran fasa terhubung dengan *ground* atau dengan saluran fasa lainnya[3]. Hubung singkat mengakibatkan timbulnya aliran arus dengan nilai yang besar menuju ke titik gangguan. Aliran arus ini berasal dari arus kontribusi yang berasal dari grid, generator, dan motor listrik AC, sehingga nilai arus gangguan tersebut sangat besar dan dapat merusak peralatan listrik yang berada di sekitar titik gangguan. Gangguan hubung singkat digolongkan menjadi dua, yaitu: gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat asimetri[2].

Adapun fase peralihan dalam hubung singkat, dibagi menjadi 3 yaitu fase peralihan subtransien, transien, dan *steady state*. Untuk menentukan arus hubung singkat pada subtransien, maka digunakan reaktansi subtransien (X_d''). Reaktansi ini dimiliki oleh mesin sinkron dan motor induksi. Reaktansi subtransien akan bertambah besar menjadi reaktansi transien (X_d'). Reaktansi transien hanya dimiliki oleh mesin sinkron saja, tidak pada motor induksi. Kemudian nilainya akan meningkat menjadi reaktansi sinkron (X_d) untuk menentukan arus hubung singkat yang mengalir setelah keadaan *steady state* tercapai[4].

2.1.1.1 Gangguan Hubung Singkat Simetri

Gangguan hubung singkat simetri atau gangguan hubung singkat seimbang yaitu gangguan yang terjadi pada ketiga fasanya, sehingga arus maupun tegangan setiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi, seperti pada Gambar 2.1. Presentasi peluang terjadinya gangguan hubung singkat simetri dilapangan sekitar 3% – 5% atau dapat dikatakan sangat jarang terjadi[2].



Gambar 2. 1 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa [1]

Gangguan ini dapat dianalisa dengan menggunakan komponen urutan positif saja, seperti persamaan 2.1 berikut:

$$I_{sc\ 3\phi} = \frac{V_{LN}}{Z_1} \dots \dots \dots (2.1)$$

dimana:

$I_{sc\ 3\phi}$: arus hubung singkat 3 fasa

V_{LN} : tegangan nominal *line to netral*

Z_1 : impedansi urutan positif dilihat dari titik gangguan

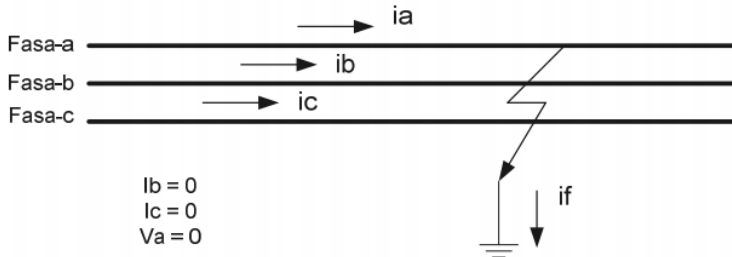
2.1.1.2 *Gangguan Hubung Singkat Asimetri*

Gangguan hubung singkat asimetri merupakan gangguan yang mengakibatkan tegangan dan arus yang mengalir disetiap fasanya menjadi tidak seimbang. Gangguan ini terdiri dari hubung singkat satu fasa ke tanah yang memiliki presentase peluang terjadinya di lapangan 65% - 70%, hubung singkat dua fasa yang memiliki presentase peluang terjadinya di lapangan 20% - 25%, dan hubung singkat dua fasa ke tanah yang memiliki presentase peluang terjadinya di lapangan 10% - 15% [2]. Dari presentasi peluang terjadinya di lapangan, dapat disimpulkan bahwa gangguan hubung singkat asimetri adalah gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik.

Untuk menganalisa sistem tiga fasa yang tidak seimbang menggunakan metode yang ditemukan oleh C.L Fortesque pada tahun 1918, metode ini menganalisa sistem tidak seimbang tersebut yang terdiri dari arus atau tegangan yang tidak seimbang antar fasanya dapat dipecah menjadi tiga komponen simetris dari sistem tiga fasa yang seimbang, yaitu komponen urutan positif, komponen urutan negatif, dan komponen urutan nol [1].

2.1.1.2.1 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah

Gangguan ini terjadi ketika satu saluran fasa menyentuh *ground* seperti pada Gambar 2.2. Gangguan ini paling sering terjadi di lapangan. Untuk menganalisa arus gangguan yang terjadi menggunakan metode komponen simetris.



Gambar 2.2 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah [1]

Besarnya arus hubung singkat satu fasa ketanah dapat dihitung menggunakan persamaan 2.2 berikut:

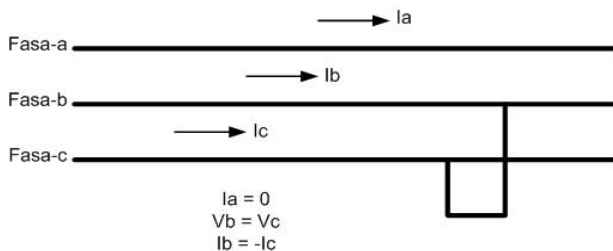
$$I_{sc\ 1\phi} = \frac{3V_{LN}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

- $I_{sc\ 1\phi}$ = arus hubung singkat 1 fasa ketanah
- V_{LN} = tegangan nominal *line to netral*
- Z_0 = impedansi urutan nol
- Z_1 = impedansi urutan positif
- Z_2 = impedansi urutan negative

2.1.1.2.2 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Gangguan ini terjadi ketika antar saluran fasa bersentuhan atau gangguan hubung singkat yang terjadi antara kedua fasanya. Gangguan ini tidak mengandung urutan nol, karena tidak terjadi gangguan yang terhubung ke tanah, seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa [1]

Besarnya arus hubung singkat dua fasa dapat dihitung menggunakan persamaan 2.3 berikut:

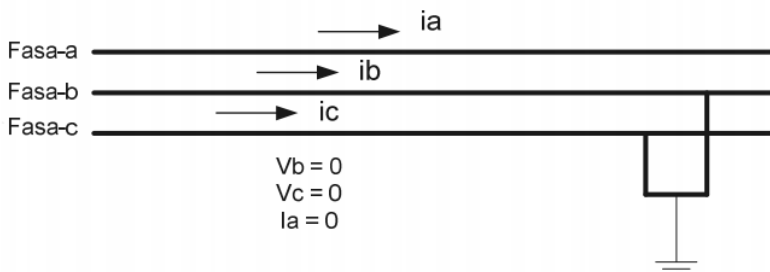
$$I_{sc\ 2\phi} = \frac{V_{LL}}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{3} \times V_{LN}}{2 \cdot Z_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{sc\ 3\phi} \approx 0.866 \times I_{sc\ 3\phi} \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan:

- $I_{sc\ 3\phi}$: arus hubung singkat 3 fasa
- $I_{sc\ 2\phi}$: arus hubung singkat 2 fasa
- V_{LN} : tegangan nominal *line to neutral*
- V_{LL} : tegangan nominal *line to line*
- Z_1 : impedansi urutan positif
- Z_2 : impedansi urutan negatif

2.1.1.2.3 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah

Gangguan yang terjadi ketika kedua fasanya terhubung ke tanah, seperti pada Gambar 2.4. Gangguan ini adalah salah satu dari macam gangguan asimetris, sehingga analisisnya menggunakan komponen simetris.



Gambar 2.4 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah [1]

Besarnya arus hubung singkat dua fasa ketanah dapat dihitung menggunakan persamaan 2.4 berikut:

$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)} \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan:

- I_{A1} : arus hubung singkat 2 fasa ketanah
- V_f : tegangan bus saat gangguan
- Z_1 : impedansi urutan positif
- Z_2 : impedansi urutan negatif
- Z_3 : impedansi urutan nol

2.1.2 Gangguan Beban Lebih

Gangguan beban lebih terjadi ketika arus hubung singkat lebih besar daripada arus nominal ($I > I_{NOM}$) atau konsumsi daya listrik melebihi daya listrik yang dihasilkan pada pembangkit[2]. Beban lebih dapat terjadi pada trafo atau pada saluran karena beban yang dipasoknya terus meningkat, atau karena adanya perubahan aliran beban di jaringan setelah adanya gangguan. Beban lebih dapat mengakibatkan pemanasan yang berlebihan yang selanjutnya panas yang berlebihan itu dapat mempercepat proses penuaan atau memperpendek umur peralatan listrik.

2.2 Sistem Pengaman Tenaga Listrik

Sebuah sistem kelistrikan yang baik harus menjamin kontinuitas suplai daya dan faktor keamanan, sebab gangguan yang tidak diinginkan selalu terjadi pada suatu sistem. Tipe gangguan utama pada sistem tiga fasa adalah hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dua fasa ketanah, dan satu fasa ke tanah. Ketika sebuah gangguan terjadi, arus yang mengalir menuju titik gangguan dan harus segera dilokalisir. Masalah ini akan diselesaikan dengan mendeteksi gangguan dan pemutusan rangkaian yang terganggu dengan menggunakan peralatan proteksi. Dasar peralatan proteksi adalah rele pengaman, *circuit breaker*, dan *fuse*. Sedangkan sistem pengaman terdiri dari kumpulan peralatan proteksi yang terkoordinasi satu sama lain agar beroperasi secara selektif.[2]

Rele adalah suatu peralatan pengaman pada sistem tenaga listrik yang bekerja dengan cara mendeteksi arus gangguan dan memerintahkan pemutus untuk bekerja agar memisahkan aliran daya

antara area yang terkena gangguan dan area yang normal. Skema dari kerja rele pengaman ditampilkan pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Skema Konsep Kerja Rele [2]

Rele pengaman terdiri dari sebuah elemen operasi dan kontak. Elemen operasi akan menerima masukan dari trafo arus atau trafo tegangan. Keadaan keluaran rele adalah posisi kontak menutup dan ditahan. Rele akan memberikan sinyal kepada pemutus tenaga agar membuka dan mengisolasi sistem tenaga lain dari gangguan yang terjadi jika keadaan keluaran kontak rele menutup [5]. Rele proteksi sebagai komponen utama sistem proteksi tenaga listrik dalam melaksanakan tugasnya yaitu untuk mengidentifikasi gangguan harus memenuhi persyaratan keandalan (*reliability*) sebagai berikut:

1. Kecepatan bereaksi
Semakin cepat waktu pemutusan arus gangguan maka dapat mengurangi dampak gangguan serta menjaga kestabilan sistem.
2. Sensitifitas
Kemampuan dari rele pengaman untuk merespon adanya gangguan di dalam daerah yang diproteksinya. Rele harus cukup peka dalam mengidentifikasi adanya gangguan minimum.
3. Selektifitas
Kemampuan rele pengaman untuk menentukan titik terjadinya gangguan serta melakukan pemutusan pada *breaker* secara tepat. Dalam hal ini rele hanya membuka pemutus tenaga yang diperlukan saja (tidak menyebabkan pemutusan atau pemadaman jaringan yang lebih luas).
4. Keandalan
Kemampuan sistem proteksi untuk menjamin peralatan proteksi akan bekerja jika terjadi suatu gangguan dan tidak akan bekerja jika tidak terjadi gangguan.
5. Ekonomis
Pertimbangan pemilihan peralatan yang harus atau tidak untuk dipasang sebagai peralatan pengaman perlu direncanakan agar tercapai sistem pengaman yang efektif dan ekonomis. [2]

2.2.1 Rele Arus Lebih [2]

Rele arus lebih digunakan untuk mengamankan gangguan beban lebih (*overload*) dan gangguan hubung singkat (*short circuit*). Rele arus lebih bekerja berdasarkan besarnya arus masukan dan apabila besarnya arus masukan melebihi suatu harga tertentu yang dapat diatur (I_{pp}) maka rele arus lebih tersebut akan bekerja.

Rele arus lebih ini beroperasi ketika terdapat arus yang mengalir pada rangkaian melebihi batas *setting* yang telah di ijinakan. Penggunaan rele arus lebih pada sistem kelistrikan industri harus disesuaikan berdasarkan koordinasi rele yang telah di *setting* dengan benar. Sehingga ketika pada sistem terjadi suatu gangguan rele ini bisa bekerja dengan cepat. Rele arus lebih akan bekerja apabila memenuhi keadaan sebagai berikut:

$I_f > I_{pp}$ rele bekerja (*trip*)

$I_f < I_{pp}$ tidak bekerja (*blok*)

Setting rele arus lebih tidak boleh bekerja pada saat beban maksimum. Arus *setting* harus lebih besar dari arus beban maksimum. Pada tugas akhir ini menggunakan $1,05 - 1,4 I_{set}$. Jadi untuk *setting* dapat dilihat pada persamaan 2.5, 2.6, dan 2.7 sebagai berikut:

$$1,05 \times I_{FLA} \leq I_{set} \leq 1,4 \times I_{FLA} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$Tap = \frac{I_{set}}{nCT} \dots \dots \dots (2.6)$$

$$I_{aktual} = I_{set} = Tap \times nCT \dots \dots \dots (2.7)$$

dimana :

I_{FLA} = arus nominal *full load ampere*

Tap = arus *pick up setting* rele

I_{set} = arus *setting* aktual

nCT = rasio CT

Dicari nilai dibawahnya yang terdekat.

Pada penyetelan rele arus lebih juga harus memperhatikan batas maksimum *setting*, untuk alasan keamanan dan *back up* hingga ke sisi muara estimasi *setting* ditetapkan seperti pada persamaan 2.8:

$$I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ minimum}} \dots \dots \dots (2.8)$$

$I_{sc \text{ minimum}}$ adalah arus hubung singkat 2 fasa (*line to line*) dengan pembangkitan minimum yang terjadi diujung saluran seksi berikutnya. Besar arus ini diperoleh dari arus hubung singkat 3 fasa pada pembangkitan minimum dikalikan 0,866. Mengacu pada konsep diatas persyaratan setelan arus dapat dirumuskan seperti persamaan 2.9 sebagai berikut :

$$1,6 \times I_{FLA} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc \text{ minimum}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Untuk operasi yang selektif, apabila terdapat beberapa rele arus lebih pada suatu jaringan radial. Maka rele pada ujung yang terjauh dari sumber harus disetel untuk dapat bekerja pada waktu yang sesingkat mungkin. Untuk jenis rele arus yang lebih karakteristik *inverse*, *setting* waktunya ditentukan pada saat arus gangguan maksimum. Rele arus lebih ini melindungi hampir semua bagian pada sistem tenaga listrik seperti transformator, motor, dan generator. Sesuai standar IEEE 242 mengenai koordinasi proteksi overcurrent relay, rele analog pada umumnya akan bekerja dengan waktu 0,3-0,4 detik. Sedangkan untuk rele digital berbasis mikroprosesor akan bekerja saat 0,2-0,3 detik[11]. Tujuan adanya standar waktu kerja rele adalah untuk memastikan zona backup akan bekerja apabila zona primer gagal bekerja. Tujuan lain adalah untuk menghindari terjadinya trip secara serentak. Karakteristik waktu rele arus lebih dapat dibedakan dalam tiga jenis antara lain rele arus lebih waktu terbalik (*inverse*), rele arus lebih waktu terbatas (*definite*), dan rele arus lebih waktu seketika (*instantaneous*).

2.2.1.1 Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (*inverse*)

Rele arus lebih waktu terbalik adalah suatu rele yang mempunyai karakteristik semakin besar gangguan maka rele tersebut akan cepat bekerja akibat gangguan serta semakin kecil waktu tundanya, begitupula sebaliknya. *Setting* rele ini adalah tidak boleh bekerja saat beban maksimum, sehingga *setting* arus dari rele ini harus lebih besar dari arus beban penuh dari peralatan yang akan diamankan. Arus beban penuh suatu peralatan listrik tergantung dari besarnya kapasitas daya, tegangan, dan power faktor dari peralatan tersebut. Dalam penyetelan rele arus lebih waktu *inverse*, untuk menentukan waktu operasi rele dibutuhkan nilai untuk parameter overcurrent dan *setting time dial*. Berdasarkan British Standard BS-142, penentuan overcurrent ditentukan dengan persamaan (2.10)

$$1.05 \times I_{FLA} < I_{set} < 1.3 \times I_{FLA} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana FLA pada persamaan tersebut adalah arus beban penuh. Pada rele arus lebih waktu terbalik ini selalu mempunyai *time dial* atau kelengkungan kurva (TMS). Setiap *merk* rele mempunyai perhitungan *time dial* yang berbeda-beda. Sebagai contoh perhitungan *time dial* berdasarkan merk AREVA – micom p139 sebagai berikut :

$$t = k \cdot \frac{a}{\left(\frac{I}{I_{ref}}\right)^{b-1}} \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

t adalah *time delay* atau waktu tunda

k adalah kelengkungan kurva atau *time dial* (TMS)

I adalah nilai arus dalam satuan ampere

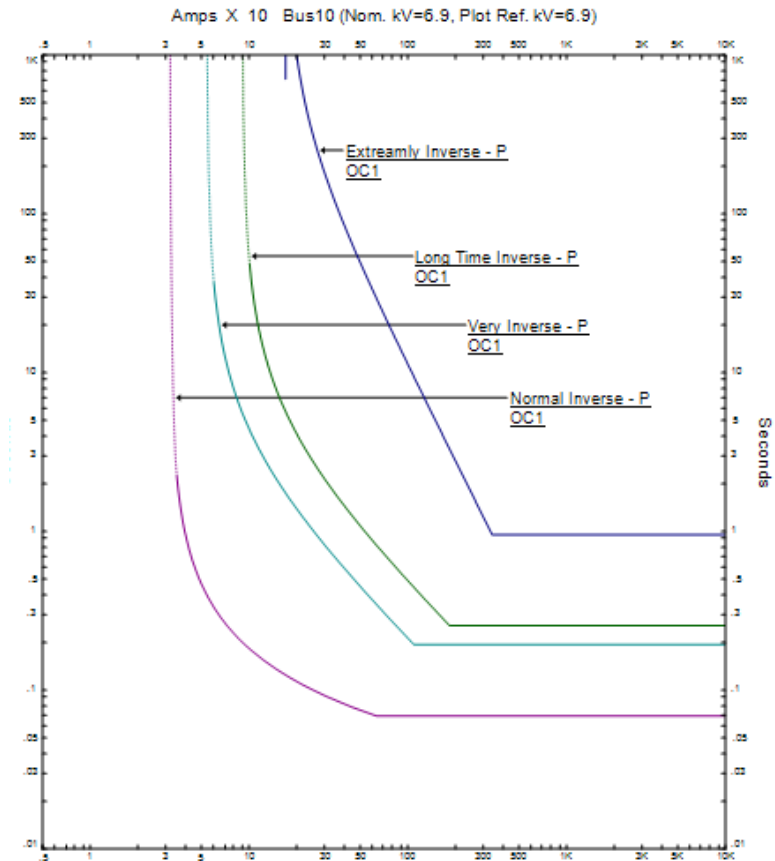
I_{ref} adalah nilai arus pickup dalam ampere

a dan b adalah koefisien invers yang dijelaskan pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Tabel Koefisien Kurva Rele Invers

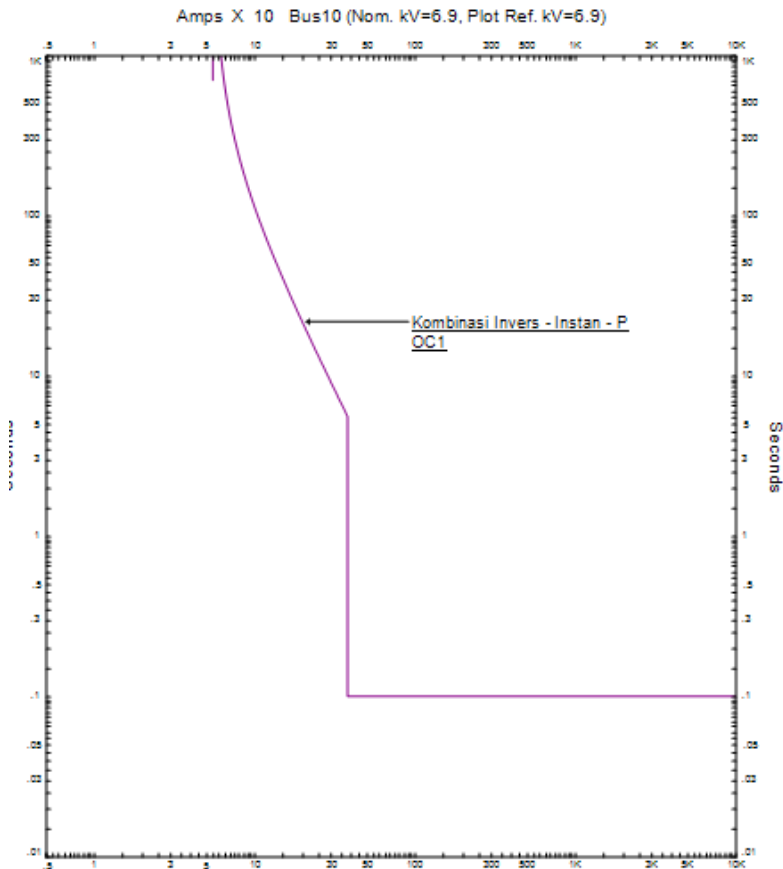
Tipe Kurva	Nilai Koefisien	
	a	b
Standard Inverse	0,14	0,02
Very Inverse	13,5	1
Extreamly Inverse	80	2
Long Time Inverse	120	1

Macam-macam karakteristik kurva rele arus lebih waktu terbalik (inverse) terlihat seperti pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2. 6 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (*Inverse*)

Seiring berjalannya waktu, terjadi kombinasi dalam penggunaan rele arus lebih waktu terbalik dan rele arus lebih waktu seketika. Karakteristik kurva terlihat seperti pada Gambar 2.7.

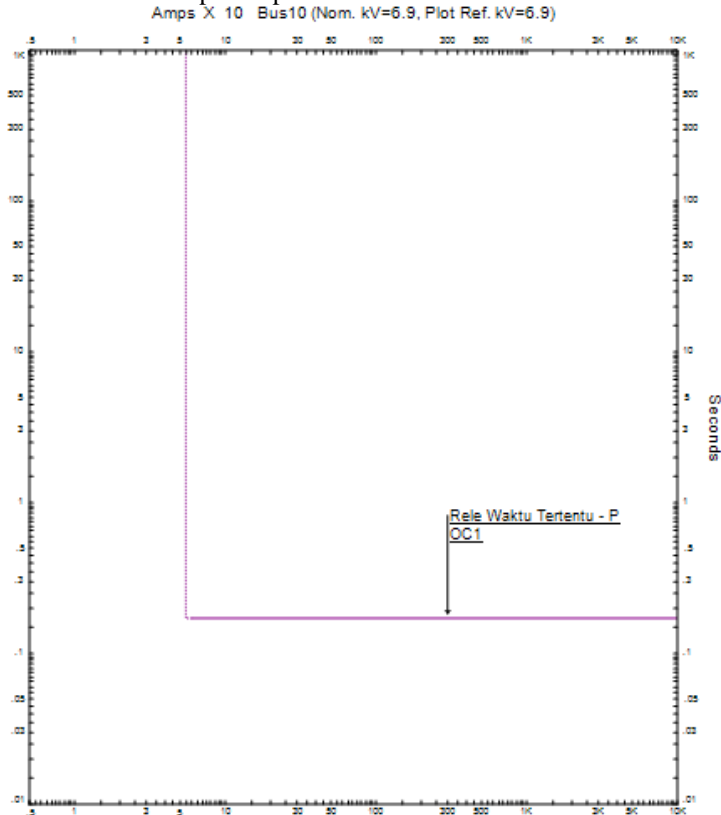


Gambar 2.7 Karakteristik Kombinasi Rele Arus Lebih Waktu Terbalik Dengan Rele Arus Lebih Waktu Seketika

2.2.1.2 *Rele Arus Lebih Waktu Terbatas (definite)*

Rele arus lebih waktu terbatas adalah ketika semua level arus yang melebihi pick-up *setpoint*-nya akan diputuskan dalam waktu yang sama (definite). Sistem rele ini dapat disesuaikan sedemikian rupa sehingga *breaker* atau PMT yang paling dekat dengan sumber gangguan akan bekerja (trip) lebih cepat daripada yang lain, dan

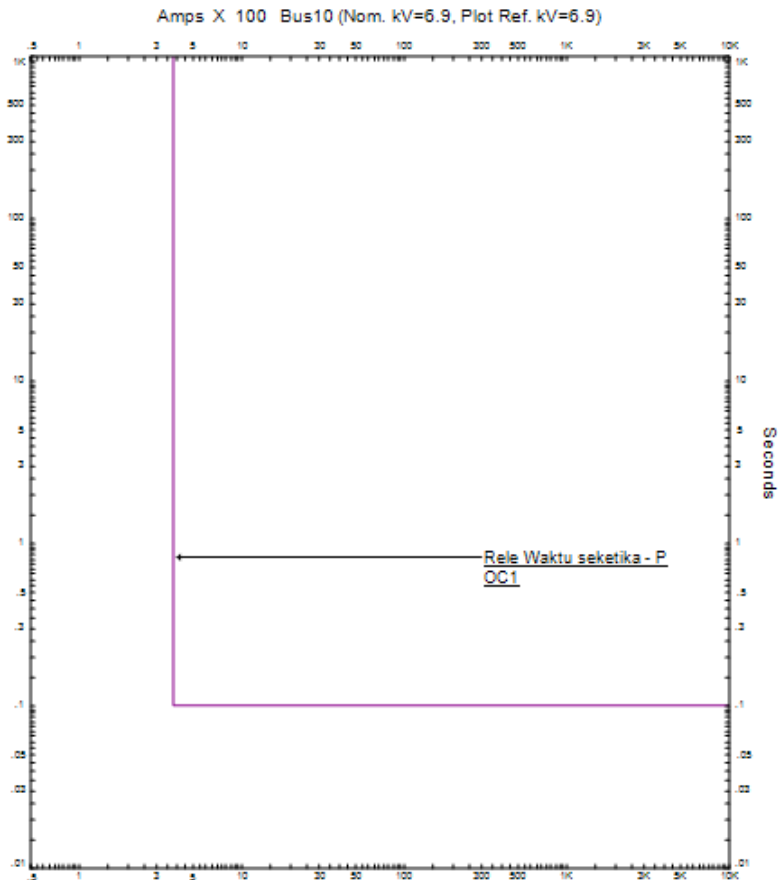
pengaman sisanya akan trip lebih cepat daripada yang lain, dan pengaman lainnya akan trip setelah waktu tunda (time delay) yang diberikan ketika gangguan masih terus berlanjut. Karakteristik kurva rele tersebut ditampilkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

2.2.1.3 *Rele Arus Lebih Waktu Seketika (instantaneous)*

Rele arus lebih waktu seketika adalah rele yang bekerja secara seketika atau tanpa adanya penundaan waktu ketika arus yang mengalir melebihi nilai *setting* maka rele akan bekerja beberapa mili detik. Untuk karakteristik kurva rele arus lebih waktu seketika ditampilkan pada Gambar 2.9.



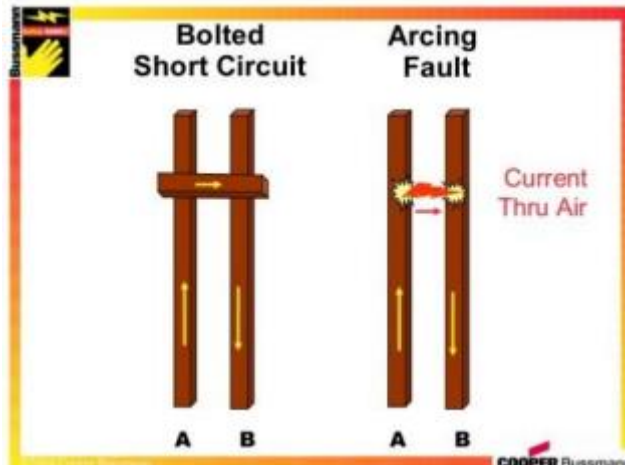
Gambar 2. 9 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika

1.2.2 Rele Diferensial

Rele diferensial adalah rele yang bekerja berdasarkan hukum Kirchof II, dimana arus yang masuk sama dengan arus yang keluar pada sebuah titik daerah pengaman yang dibatasi lebih dari satu CT (*Current Transformer*). Secara umum rele diferensial digunakan sebagai pengaman belitan transformator, belitan generator, belitan motor, saluran kabel/pendek, dan busbar[2].

2.3 Busur Api

Definisi dari busur api adalah pelepasan energi panas yang sangat tinggi sehingga mengakibatkan *arc fault* ataupun *bolted fault*. *Arc fault* dan *bolted fault* memiliki makna yang berbeda, *arc fault* adalah arus gangguan yang mengalir melalui udara antara konduktor satu dengan konduktor lainnya atau konduktor dengan tanah[5], sedangkan *bolted fault* menggunakan perantara konduktor sebagai jalur arus gangguannya. Gambar 2.10 menunjukkan perbedaan *arc fault* dengan *bolted fault* berdasarkan referensi[6].



Gambar 2. 10 Perbedaan *Arc Fault* dengan *Bolted Fault* [6]

Arc flash menghasilkan suatu dampak berupa radiasi panas yang dapat menghasilkan temperatur udara disekitarnya menjadi 35000°F [9], cahaya yang menyilaukan yang dapat mengganggu penglihatan hingga bahkan juga dapat merusak mata seseorang, dan tekanan yang sangat besar. Beberapa variabel yang mempengaruhinya meliputi arus bolted fault atau arus hubung singkat maksimum, waktu peralatan proteksi untuk menghilangkan gangguan, jarak antar konduktor, tegangan sistem, dan jarak titik arc ke pekerja [7]. Beberapa hal yang dapat menyebabkan terjadinya peristiwa *arc flash* antara lain :

- Debu, pengaratang, binatang.
- *Spark discharge* dari sentuhan/ peralatan yang terjatuh.
- Kegagalan isolasi dari peralatan

- Kegagalan kerja peralatan pengaman

Besar energi busur api yang dihasilkan tergantung dari waktu kerja sistem pengaman akibat gangguan arus hubung singkat. Semakin cepat rele pengaman bekerja semakin kecil pula busur api yang dihasilkan dan berlaku sebaliknya. Dampak *arc flash* dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Ledakan Busur Api Menyebabkan Kerusakan Oleh Api, Logam Cair, dan Panas [9]

Studi untuk mengetahui besar energi busur api yang dihasilkan pada masing-masing *switchgear* ini berhubungan erat dengan studi *short circuit* (hubung singkat) dan studi koordinasi proteksi. Hasil dari studi hubung singkat digunakan untuk menentukan arus gangguan pada *momentary duty*, *interrupting rating*, dan *rating* hubung singkat (*withstand*) dari peralatan listrik. Hasil dari studi koordinasi proteksi digunakan untuk menentukan waktu koordinasi proteksi agar dapat mengisolasi gangguan hubung singkat atau beban lebih. Hasil dari studi

hubung singkat dan studi koordinasi proteksi digunakan untuk menganalisis bahaya *arcflash*. Hasil dari analisis bahaya *arc flash* digunakan untuk mengidentifikasi jarak aman perlindungan dan insiden energi untuk jarak kerja disetiap posisi atau pada sistem kelistrikan seperti generator, transmisi, distribusi, atau sistem utilitas [8].

2.3.1 Perhitungan Busur Api

Untuk menentukan waktu operasi pada perangkat pengaman, maka langkah pertama adalah memperkirakan arus *arc* tiga fasa[8]. Untuk perhitungan arus busur api pada level tegangan di bawah 1000V dapat menggunakan persamaan 2.11.

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf}) \dots\dots\dots(2.11)$$

Sedangkan untuk perhitungan arus busur api dengan level tegangan $\geq 1000V$ dapat menggunakan persamaan 2.12.

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana

\lg = \log_{10}

I_a = arus arcing (kA)

K = konstanta untuk konfigurasi terbuka = -0,153 dan
konstanta untuk konfigurasi box = -0,097

$\lg I_{bf}$ = *bolted fault current* pada gangguan tiga fase
(symmetrical RMS) (kA)

V = tegangan sistem (kV)

G = jarak celah antar konduktor (mm)

Setelah nilai *arcing current* diketahui maka nilai dari *incident energy* normalisasi dapat dihitung. Dalam perhitungan besar energi yang normal, menggunakan referensi waktu *arcing* dengan durasi 0,2 detik dan jarak dari titik *arcing* ke manusia sebesar 610 mm dengan persamaan 2.13 dan 2.14.

$$\lg E_n = K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \dots\dots\dots(2.13)$$

$$E_n = 10^{\lg E_n} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

- E_n = *incident energy normalized* (J/cm²)
 K1 = -0,792 untuk konfigurasi terbuka (*no enclosure*)
 -0,555 untuk konfigurasi *box* (*enclosed equipment*)
 K2 = 0 untuk sistem *ungrounded and high-resistance grounded*
 -0,113 untuk sistem *grounded*
 G = jarak/celah antar konduktor (mm)

Untuk mendapatkan nilai G (gap atau jarak antar konduktor) diperoleh dari spesifikasi busbar atau dapat mengikuti standar IEEE yang sudah ada. Dalam Tabel 2.2 dijelaskan untuk jarak celah bus pada beberapa peralatan lain dengan referensi dari IEEE 1584-2002.

Tabel 2. 2 Tabel Data Jarak Celah Bus (Jarak Bus) [8]

Kelas Peralatan	Jarak celah antar konduktor (mm)
<i>6-15kV Switchgear</i>	153
<i>5kV Switchgear</i>	102
<i>Low voltage switchgear</i>	32
<i>Low voltages MCCs and panelboards</i>	25
<i>Cable</i>	13
<i>Other</i>	<i>Not required</i>

Setelah nilai E_n didapatkan, untuk menghitung besar insiden energi E digunakan persamaan (2.15) berikut :

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana

- E = *incident energy* (J/cm²)
 C_f = faktor pengali
 1,0 untuk tegangan diatas 1kV, dan
 1,5 untuk tegangan dibawah 1kV
 E_n = *incident energy normalized*
 t = waktu *arcing* (detik) yang dapat dilihat pada Tabel
 D = jarak kerja (mm) yang dapat dilihat pada Tabel 2.3
 X = jarak eksponen yang dapat dilihat pada Tabel 2.3

Jika untuk menghitung level insiden energi busur api, namun tidak mengetahui pasti berapa jarak celah konduktor, jarak eksponen, maupun jarak kerja, dapat menggunakan tipikal yang dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Tabel Data Parameter-Parameter yang Dibutuhkan Untuk Perhitungan Insiden Energi[8]

Level Tegangan (kV)	Jenis Peralatan	Jarak celah antar konduktor (mm)	Jarak eksponen	Jarak kerja (mm)
0,208 – 1	<i>Open air</i>	10–40	2	-
	<i>Switchgear</i>	32	1,473	455
	<i>MCC and panels</i>	25	1,641	455
	<i>Cable</i>	13	2	455
> 1 – 5	<i>Open air</i>	102	2	-
	<i>Switchgear</i>	13–102	0,973	610
	<i>Cable</i>	13	2	455
>5 – 15	<i>Open air</i>	13–153	2	-
	<i>Switchgear</i>	153	0,973	910
	<i>Cable</i>	13	2	455

2.3.2 Jarak Aman Perlindungan (*Flash Protection Boundary*)

National Fire Protection Association (NFPA) telah mengembangkan sebuah pendekatan dalam menentukan batasan - batasan khusus yang dirancang untuk melindungi pekerja saat bekerja pada atau dekat peralatan yang bertegangan [6]. Ada 4 batasan perlindungan yang ditetapkan, yaitu :

1. Flash Protection Boundary

Ketika sebuah bahaya busur api terjadi, seorang pekerja yang berada pada batasan ini masih dapat terkena dampak luka bakar tingkat kedua jika dia tidak menggunakan alat perlindungan diri ketika tingkat insiden energinya 5 J/cm^2 (1.2 cal/cm^2).

2. Limited Approach Boundary

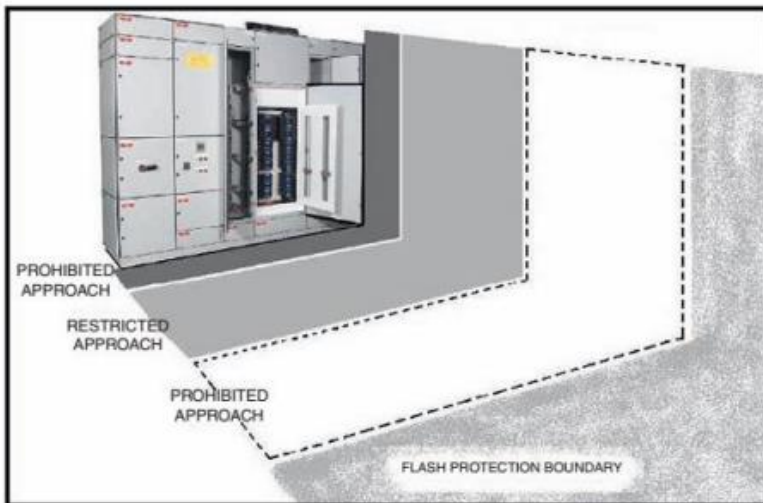
Sebuah pendekatan terhadap batasan jarak dari sebuah konduktor listrik bertegangan atau bagian rangkaian yang mana terdapat bahaya sengatan listrik.

3. Restricted Approach Boundary

Sebuah pendekatan terhadap batasan jarak dari sebuah konduktor listrik bertegangan dimana ada peningkatan risiko terkena sengatan listrik, karena busur api dikombinasikan dengan gerakan yang tidak disengaja.

4. Prohibited Approach Boundary

Sebuah pendekatan terhadap batasan jarak dari sebuah konduktor listrik bertegangan dimana pekerja dianggap memiliki kontak langsung dengan konduktor listrik. Agar lebih jelasnya, Flash Protection Boundary dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Pendekatan Batasan yang Mengatur Jarak Pekerja Dengan Peralatan Bertegangan Berdasarkan Tingkat Resiko [9]

Flash protection boundary dapat dihitung menggunakan persamaan 2.16 sebagai berikut:

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \dots\dots\dots(2.16)$$


Dimana:

- D_B = batas jarak dari titik busur api (mm)
 - C_f = faktor perhitungan (1.0 untuk tegangan di atas 1 kV, 1.5 untuk tegangan di bawah atau sama dengan 1 kV)
 - E_n = energi insiden normal
 - E_B = energi insiden dalam J/cm² pada batas jarak
 - t = waktu (detik)
 - x = jarak exponen
 - I_{bf} = *bolted fault current* (kA)
- E_B dapat disetting 5,0 J/cm² untuk *bare skin (no hood)* atau rating dari PPE yang diajukan (5,0 J/cm² = 1,2 cal/cm²)



2.4 Pengelompokan Kategori Energi Busur Api dengan Perlengkapan Keselamatan Diri Sesuai Standar NFPA 70E-2009

Perlengkapan keselamatan diri diklasifikasikan berdasarkan insiden energi yang terjadi ketika peristiwa busur api sedang berlangsung. Oleh karena itu, setelah menghitung besar energi busur api yang dihasilkan oleh tiap-tiap bus, maka dilakukan pengelompokan atau pengkategorian perlengkapan keselamatan yang harus digunakan bagi siapa saja yang masuk ke area tersebut. Kategori ini juga didasari oleh dampak yang ditimbulkan bagi tubuh manusia. Selain itu juga menentukan *flash boundary protection* yaitu jarak antara pekerja tanpa alat perlindungan diri dengan sumber busur api langsung. Perlengkapan apa saja yang harus digunakan diatur dalam standar NFPA 70E-2009[10] seperti pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Klasifikasi Alat Perlindungan Diri Dan Contoh Pakaian Pelindung

Kategori	Perlengkapan Alat Pelindung Diri	Pakaian Yang Digunakan
0	<ul style="list-style-type: none"> • Pelindung Mata • Pelindung Telinga • Kemeja Lengan Panjang • Celana Panjang 	

Tabel 2.4 Klasifikasi Alat Perlindungan Diri Dan Contoh Pakaian Pelindung (lanjutan)

Kategori	Perlengkapan Alat Pelindung Diri	Pakaian Yang Digunakan
1	<ul style="list-style-type: none"> • Pakaian Tahan Api • Pelindung Mata • Pelindung Telinga • Celana Panjang 	
2	<ul style="list-style-type: none"> • Pelindung Wajah dan Kepala • Pakaian Tahan Api • Pelindung Mata • Pelindung Telinga • Celana Panjang 	

Tabel 2.4 Klasifikasi Alat Perlindungan Diri Dan Contoh Pakaian Pelindung (lanjutan)

Kategori	Perlengkapan Alat Pelindung Diri	Pakaian Yang Digunakan
3	<ul style="list-style-type: none"> • Flash Suit Hood • Pelindung Wajah dan Kepala • Pakaian Tahan Api • Pelindung Mata • Pelindung Telinga • Celana Panjang 	
4	<ul style="list-style-type: none"> • Up to 40 cal/cm² Flash Suit Hood • Pelindung Wajah dan Kepala • Pakaian Tahan Api • Pelindung Mata • Pelindung Telinga • Celana Panjang 	

Standar kategori serta berapa standar cal/cm² pada *Personal Protective Equipment* (PPE) yang sesuai dengan besar insiden busur

api yang akan ditimbulkan seperti pada Tabel 2.5. Semakin besar energi insiden busur api yang akan ditimbulkan maka akan mempengaruhi jenis *Personal Protective Equipment* (PPE) yang akan dipakai jika mendekati peralatan bertegangan saat melakukan perawatan atau perbaikan. Jika kita tidak memperhatikan *Personal Protective Equipment* (PPE) akan mengakibatkan kecelakaan kerja yang dapat menimbulkan kematian akibat besar insiden busur api yang akan ditimbulkan.

Tabel 2. 5 Standar NFPA 70E - 2009

Kategori	Cal/Cm ²
0	1,2
1	4
2	8
3	25
4	40

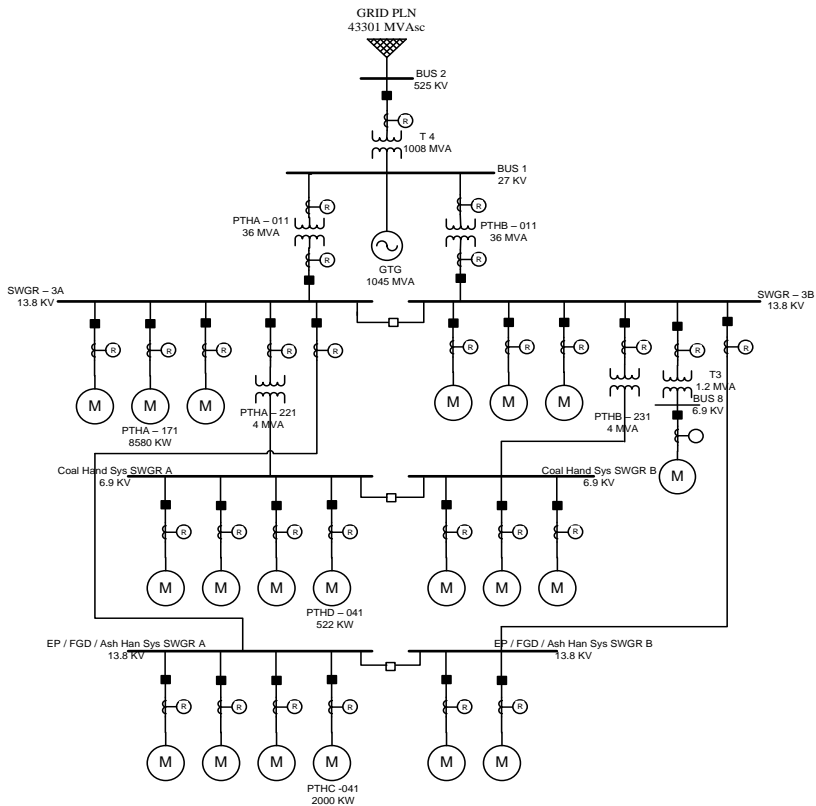
---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB III

SISTEM KELISTRIKAN PLTU PAITON UNIT 3

3.1 Sistem Kelistrikan PLTU Paiton Unit 3

PLTU Paiton adalah salah satu pembangkit yang mempunyai peran sangat vital dalam sistem interkoneksi Jawa-Madura-Bali (JAMALI). PLTU Paiton Unit 3 merupakan salah satu proyek percepatan pembangunan pembangkit listrik tahap 2 dengan kapasitas 1x815 MW net yang berbahan bakar batubara. Bilamana kemampuan beroperasi 90% dalam setahun maka perkiraan total energi yang dihasilkan adalah 6.425.460 MWH / tahun dan mengonsumsi batubara sebesar 3,06 juta ton pertahun. Keluaran dari generator ini selain untuk utilitas dan pemakaian sendiri, output tersebut di *step-up* oleh transformator daya tersebut disalurkan menuju transmisi 500 kV. Adapun sistem kelistrikan perusahaan ini dapat dilihat pada Gambar 3.1. Pada sistem kelistrikan PLTU Paiton unit 3 ini memiliki level tegangan menengah dan tegangan rendah pada sistem *household* atau pemakaian sendiri. Level tegangan menengah terdiri dari tegangan 13,8 kV dan 6,9 kV yang berisi motor-motor berkapasitas besar, seperti: motor *Primary Air Fan* (PAF), *Induced Draft Fan* (IDF), *Boiler Feed Pump* (BFP), dan *pulvurizer*. Untuk level tegangan rendah digunakan level 0,416 kV yang berisi MCC (*Motor Control Center*) dari *fly ash conveying air compressor* motor, *hopper vibromotor*, dan *demineralized waste water pump* motor. Namun, dalam Tugas Akhir ini hanya tegangan menengah yang akan dibahas.



Gambar 3.1 Sistem Kelistrikan Tegangan Menengah PLTU Paiton Unit 3

3.2 Kapasitas Pembangkitan PLTU Paiton Unit 3

PLTU Paiton unit 3 memiliki satu pembangkit untuk memenuhi kebutuhan listrik pada sistem kelistrikannya (*utility*) dan untuk menyuplai daya ke PLN atau grid 500 kV. Dengan kapasitas pembangkit utama menggunakan level tegangan 27 KV, maka dibutuhkan transformator untuk menurunkan level tegangan 13,8 KV dan 6,9 KV. Kapasitas pembangkitan dan transformator PLTU Paiton Unit 3 pada tegangan menengah dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Data Kapasitas Pembangkit dan Transormator Pada PLTU Paiton Unit 3

No.	ID	Tegangan (KV)	Daya (MVA)
1.	STG	27	1045
2.	PTHA - 011	27 / 13,8	36
3.	PTHB - 011	27 / 13,8	36
4.	PTHA - 221	13.8 / 6,9	4
5.	PTHB - 231	13.8 / 6,9	4
6.	T3	13.8 / 6,9	1.2
7.	T4	27 / 525	1008

3.3 Data Beban PLTU Paiton Unit 3

Pada PLTU Paiton Unit 3 beban didominasi oleh motor, baik motor berkapasitas besar maupun kecil. Total beban yang harus dilayani untuk beban pemakaian sendiri atau *household* adalah sebesar 34 MW yang terbagi dalam dua *feeder* atau penyulang. Untuk pembebanan pada tegangan menengah secara detail akan ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Data Beban Motor PLTU Paiton Unit 3

No.	ID Motor	Lokasi	Rating Tegangan (KV)	Rating Daya (KW)
1.	PTHA - 041	SWGR - 3A	13.8	950
2.	PTHA - 051		13.8	950
3.	PTHA - 061		13.8	950
4.	PTHA - 071		13.8	3400
5.	PTHA - 081		13.8	2500
6.	PTHA - 091		13.8	8580
7.	PTHA - 101		13.8	67770
8.	PTHA - 111		13.8	1550
9.	PTHA - 121		13.8	1550
10.	PTHA - 131		13.8	3300
11.	PTHA - 141		13.8	1150
12.	PTHA - 151		13.8	670
13.	PTHA - 161		13.8	250

Tabel 3. 2 Data Beban Motor PLTU Paiton Unit 3 (lanjutan)

No.	ID Motor	Lokasi	Rating Tegangan (KV)	Rating Daya (KW)
14.	PTHA - 171	SWGR – 3A	13.8	8580
15.	PTHB - 041	SWGR - 3B	13.8	950
16.	PTHB - 051		13.8	950
17.	PTHB - 061		13.8	950
18.	PTHB - 071		13.8	3400
19.	PTHB - 081		13.8	2500
20.	PTHB - 091		13.8	8580
21.	PTHB - 101		13.8	6770
22.	PTHB - 111		13.8	1550
23.	PTHB - 121		13.8	570
24.	PTHB - 131		13.8	3300
25.	PTHB - 141		13.8	3300
26.	PTHB - 151		13.8	1150
27.	PTHB - 161		13.8	670
28.	PTHB - 171		13.8	250
29.	PTHB - 181		13.8	470
30.	PTHC - 011	EP / FGD/ Ash Hand Sys SWGR A	13.8	2000
31.	PTHC - 021		13.8	650
32.	PTHC - 031		13.8	650
33.	PTHC - 041		13.8	2000
33.	PTHC - 131	EP / FGD/ Ash Hand Sys SWGR B	13.8	2000
34.	PTHC - 141		13.8	650
35.	PTHD - 011	Coal Hand Sys SWGR A	6.9	224
36.	PTHD - 021		6.9	336
37.	PTHD - 031		6.9	522
38.	PTHD - 111	Coal Hand Sys SWGR B	6.9	224
39.	PTHD - 121		6.9	336
40.	PTHD - 131		6.9	522

BAB IV

HASIL SIMULASI DAN ANALISA KOORDINASI PROTEKSI DAN BUSUR API PADA PLTU PAITON UNIT 3

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PLTU Paiton Unit 3

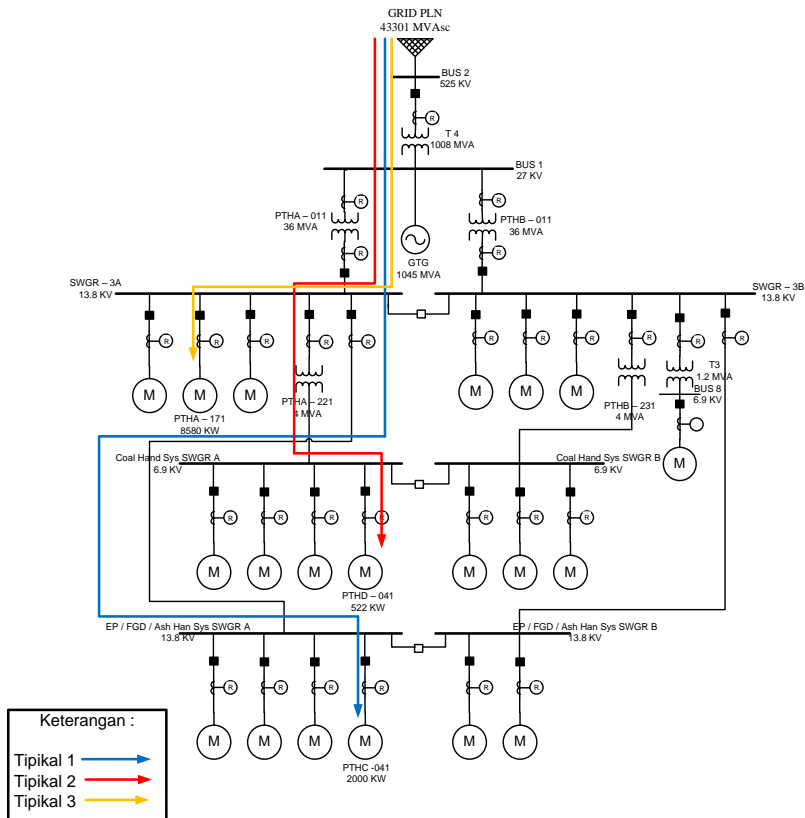
Pada bab ini akan dibahas mengenai simulasi dan analisis sistem kelistrikan PLTU Paiton Unit 3 yang memfokuskan pada analisis hubung singkat, koordinasi proteksi, dan besar level *arc flash*. Pemodelan sistem kelistrikan PLTU Paiton Unit 3 dilakukan dengan menggambar *single line* diagram menggunakan *software ETAP* dan memasukkan parameter-parameter seperti pada generator, transformator, motor, maupun bus dari data lapangan (*real*). Setelah memasukkan parameter – parameter penting tersebut, langkah selanjutnya adalah analisis hubung singkat untuk mengetahui nilai arus hubung singkat yang mengalir melewati rele untuk koordinasi proteksi.

4.2 Pemilihan Tipikal Koordinasi Pada PLTU Paiton Unit 3

Dalam melakukan koordinasi proteksi rele arus lebih diperlukan pemilihan tipikal untuk memudahkan dalam melakukan *setting* pada rele. Pemilihan tipikal yang digunakan harus dapat mewakili keseluruhan sistem kelistrikan pada PLTU Paiton Unit 3. Pada studi koordinasi proteksi PLTU Paiton Unit 3 dipilih tiga tipikal untuk rele arus lebih gangguan fasa dan rele arus lebih gangguan ke tanah yang mampu mewakili seluruh kelistrikan. Tipikal – tipikal tersebut yaitu :

1. Tipikal 1 : Koordinasi rele pengaman dari motor PTHC – 041 hingga generator STG dan trafo *step-up* yang menuju ke grid.
2. Tipikal 2 : Koordinasi rele pengaman dari motor PTHD – 041 hingga generator STG dan trafo *step-up* yang menuju ke grid.
3. Tipikal 3 : Koordinasi rele pengaman dari motor PTHA – 171 hingga generator STG dan trafo *step-up* yang menuju ke grid.

Berikut adalah Gambar 4.1 tipikal yang akan dianalisis koordinasi proteksi rele arus lebih gangguan fasa dan gangguan ke tanah pada PLTU Paiton Unit 3 :



Gambar 4. 1 Tipikal pada PLTU Paiton Unit 3

4.3 Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat

Analisis ini digunakan untuk mengetahui nilai arus hubung singkat yang mengalir di tiap-tiap titik gangguan pada tipikal yang telah ditentukan. Dengan menggunakan nilai arus hubung singkat tersebut dapat ditentukan *setting* rele arus lebih gangguan fasa. Untuk perhitungan arus hubung singkat digunakan dua parameter yaitu hubung

singkat maksimum dan hubung singkat minimum. Dalam mencari hubung singkat minimum dan maksimum digunakan arus kontribusi yang menuju ke bus atau melihat arah dari sumber menuju beban.

4.3.1 Arus Hubung Singkat Maksimum

Hubung singkat maksimum adalah hubung singkat yang terjadi pada ketiga fasanya dan saat pembangkitan yang maksimum. Pada analisis ini digunakan hubung singkat maksimum 4 *cycle* karena rele arus lebih akan bekerja pada 3-5 *cycle* dan akan menggunakan selang waktu (Δt) berkisar antara 0,08 – 0,5 *second*. Arus hubung singkat maksimum digunakan untuk menentukan *setting* kurva invers atau IDMT pada bagian time dial atau TMS (kelengkungan kurva invers) yang akan dipilih pada rele biasanya menggunakan arus kontribusi dan digunakan sebagai batasan arus hubung singkat terbesar yang mungkin terjadi. Data hasil simulasi arus gangguan hubung singkat maksimum ditunjukkan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data Arus Hubung Singkat Maksimum

No.	ID Bus	I Kontribusi (KA)				I Symm RMS (KA)
1.	SWGR – 3A	PTHA - 011	EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A	PTHA - 221	Motor – motor Bus SWGR – 3A	39,79
		14,86	1,15	0,201	23,583	
2.	Bus 1	PTHA - 011	STG	PTHB - 011	T4	14547
		4,76	14412	2,79	128,1	

Tabel 4.1 Data Arus Hubungan Singkat Maksimum (lanjutan)

No.	ID Bus	I Kontribusi (KA)				I Symm RMS (KA)
3,	SWGR – 3B	PTHB -011	Motor – motor Bus SWGR – 3B	PTHB – 231	EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B	23,5
		14,86	6,296	0,148	0,61	
4.	Coal Hand Sys SWGR A	PTHA - 221		Motor – motor Bus Coal Hand Sys SWGR A	6,08	
		5,65		0,432		
5.	Bus 2	GRID PLN		T4	55,19	
		47,62		7,57		
6.	EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A	SWGR – 3A		Motor – motor EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A	39,79	
		38,64		1,152		
		39,59		0,201		

Tabel 4.1 Data Arus Hubung Singkat Maksimum (lanjutan)

No.	ID Bus	I Kontribusi (KA)		I Symm RMS (KA)
7.	Bus 9	Bus 1	PTHA – 011	14547
		14543	4,76	
8.	Bus 10	Bus 1	PTHB – 011	14547
		14545	2,79	
9.	Coal Hand Sys SWGR B	PTHB - 231	Motor – motor Bus Coal Hand Sys SWGR B	5.7
		5,38	0,312	
10.	EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B	SWGR – 3B	Motor – motor EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B	23,5
		22,89	0,61	

Tabel 4.1 Data Arus Hubung Singkat Maksimum (lanjutan)

No.	ID Bus	I Kontribusi (KA)		I Symm RMS (KA)
11.	Bus 6	Grid PLN	T4	55,19
		47,62	7,57	
12.	Bus 7	SWGR – 3A	PTHA – 221	39,79
		39,59	0,201	

4.3.2 Arus Hubung Singkat Minimum

Hubung singkat minimum adalah hubung singkat yang terjadi pada kedua fasanya dan pada pembangkitan minimum atau pada kondisi *steady state* pada 30 cycle. Nilai dari arus hubung singkat minimum akan digunakan sebagai batasan nilai pickup kurva waktu instan. Data hasil simulasi arus gangguan hubung singkat minimum ditunjukkan dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Arus Hubung Singkat Minimum

No.	ID Bus	Tegangan (kV)	Arus Hubung Singkat Minimum (kA)
1.	Bus 1	27	12601
2.	Bus 2	525	47,79
3.	SWGR – 3A	13,8	12,87
4.	SWGR – 3B	13,8	12,87
5.	EP / FGD /Ash Han Sys SWGR - A	13,8	12,87
6.	EP / FGD /Ash Han Sys SWGR - B	13,8	12,87
7.	Coal Han Sys	6,9	4,38

Tabel 4.2 Data Arus Hubung Singkat Minimum (lanjutan)

No.	ID Bus	Tegangan (kV)	Arus Hubung Singkat Minimum (kA)
8.	Coal Han Sys SWGR B	6,9	4,38
9.	Bus 9	27	12601
10.	Bus 10	27	12601
11.	Bus 6	525	41,24
12.	Bus 7	13,8	6,08

4.4 Studi Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa

Koordinasi rele arus lebih gangguan fasa digunakan untuk mengamankan sistem akibat gangguan beban lebih maupun gangguan hubung singkat 3 fasa maupun 2 fasa. Selain itu, koordinasi ini digunakan untuk mengatur arus sensing rele dan mengatur waktu operasi rele bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Rele arus lebih tersebut harus dapat bekerja efektif dan selektif karena rele akan bekerja dengan memberikan sinyal kepada *circuit breaker* agar dapat mengisolasi gangguan sehingga tidak terjadi *overlap* antar rele, dapat menjaga kontinuitas penyaluran daya, dan menjaga peralatan dari kerusakan.

Pada standar IEEE 242 disebutkan bahwa nilai grading time untuk rele digital adalah 0,2-0,3 detik. Maka dari itu, dalam tugas akhir ini akan digunakan grading time sebesar 0,2 detik. Hal pertama yang dilakukan dalam melakukan koordinasi rele arus lebih adalah melihat kondisi *existing* di PLTU Paiton Unit 3 menggunakan kurva TCC (*Time characteristic Current Curve*). Jika rele tidak terkoordinasi dengan baik, maka perlu dilakukan *resetting* pada rele tersebut. Kedua, melakukan *resetting* yang meliputi perhitungan untuk menentukan nilai *lowset*, *time dial*, *highset* dan *time delay* dari rele arus lebih. Setelah menemukan parameter nilai untuk rele kondisi *resetting*, selanjutnya dilakukan *plotting* ulang kurva TCC dan simulasi agar didapatkan koordinasi rele yang tepat.

4.4.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 1

Koordinasi rele arus lebih tipikal 1 adalah koordinasi rele dari beban PTHC – 041 hingga trafo *step-up* T4. Untuk memudahkan analisa maka tipikal 1 dibagi menjadi tipikal 1A dan 1B. Pada tipikal 1A terdapat rele 69, rele 27, rele 3, dan rele 87, sedangkan pada tipikal 1B

terdapat rele 86. Koordinasi tipikal 1 ditunjukkan pada Gambar 4.2 sedangkan kondisi *existing* pada koordinasi tipikal 1A ditunjukkan Gambar 4.3 dan kondisi *existing* pada koordinasi tipikal 1B ditunjukkan Gambar 4.4. *Setting* dari rele pada kondisi *existing* dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data *Existing* Rele Tipikal 1A dan 1B

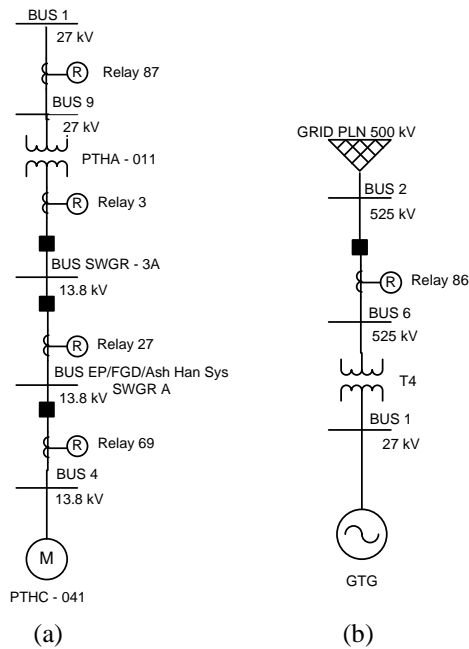
<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	
69	150/5	<i>Curve Type</i>	IEC - LTI
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec.</i>	0,1-4
		<i>Pickup Lowset</i>	0,91
		<i>Time Dial</i>	0,01
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec.</i>	0,1-40
		<i>Pickup Highset</i>	8
		<i>Time Delay</i>	-
27	600/5	<i>Curve Type</i>	IEC - VI
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec.</i>	0,1-25
		<i>Pickup Lowset</i>	0,83
		<i>Time Dial</i>	1,5
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec.</i>	0,5-40
		<i>Pickup Highset</i>	7
		<i>Time Delay</i>	0,3

Tabel 4.3 Data Existing Rele Tipikal 1A dan 1B (lanjutan)

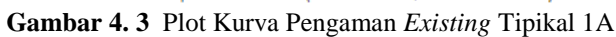
<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	
3	3000/5	<i>Curve Type</i>	IEC - EI
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec.</i>	0,1-25
		<i>Pickup Lowset</i>	0,83
		<i>Time Dial</i>	0,3
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec.</i>	0,5-40
		<i>Pickup Highset</i>	4
		<i>Time Delay</i>	0,8
87	1200/5	<i>Curve Type</i>	IEC - EI
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec.</i>	0,1-25
		<i>Pickup Lowset</i>	0,7
		<i>Time Dial</i>	0,5
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec.</i>	0,5-40
		<i>Pickup Highset</i>	8
		<i>Time Delay</i>	0,1
86	2000/5	<i>Curve Type</i>	IEC - EI
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec.</i>	0,1-4
		<i>Pickup Lowset</i>	0,8
		<i>Time Dial</i>	10

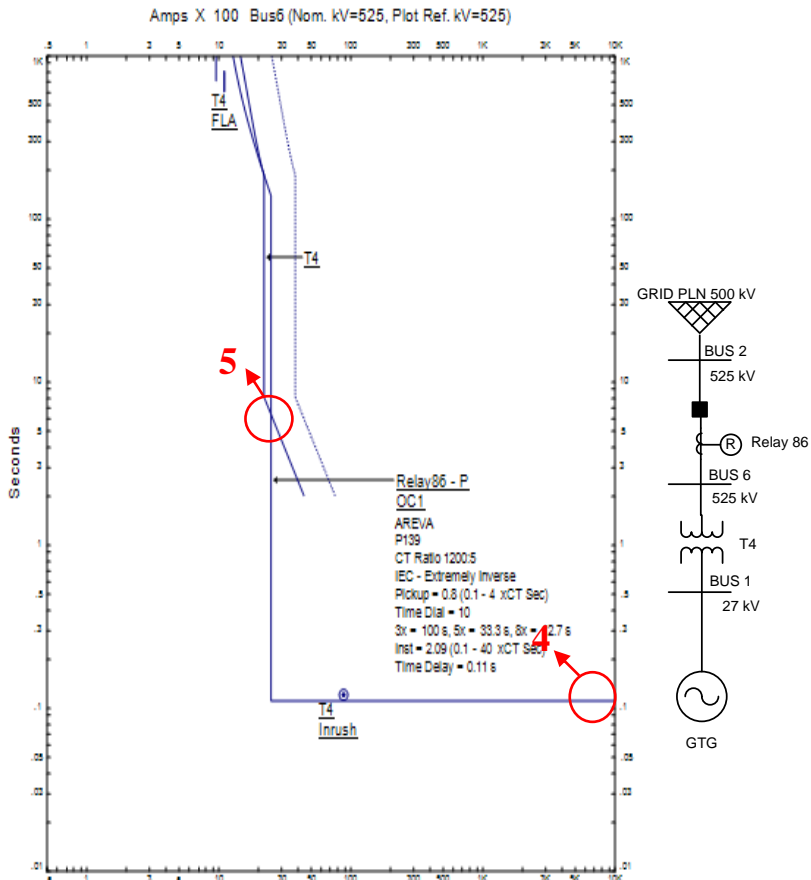
Tabel 4.3 Data Existing Rele Tipikal 1A dan 1B (lanjutan)

ID rele	CT Ratio	Setting	
86	2000/5	<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec.</i>	0,1-40
		<i>Pickup Highset</i>	2,09
		<i>Time Delay</i>	0,11



Gambar 4. 2 (a) Tipikal 1A (b) Tipikal 1B





Gambar 4. 4 Plot Kurva Pengaman *Existing* Tipikal 1B

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 1A dan 1B, terlihat masih ada beberapa koordinasi yang kurang tepat, yaitu :

1. Pada lingkaran nomor 1, kurva *invers* rele 69 masih menyentuh kurva *starting* motor, sehingga starting motor terganggu sementara, namun tidak menghentikan kerja motor.
2. Pada lingkaran nomor 2, kurva *instantaneous* rele 69 tidak mempunyai *delay* hal ini tidak sesuai dengan standar IEEE 242.

3. Pada lingkaran nomor 3, *time delay* antar rele tidak sesuai standar yaitu bukan dalam *range* 0,2 – 0,4 detik.
4. Pada lingkaran nomor 4, *time delay* berada pada 0.13 detik, hal ini tidak sesuai dengan standar. Seharusnya rele ini bekerja dengan *time delay* 0,3 detik.
5. Pada lingkaran nomor 5, kurva *instantaneous* dari rele 86 menyentuh *damage curve* dari trafo T4.

Maka dari itu, perlu dilakukan *resetting* untuk memperbaiki koordinasi pengaman pada tipikal tersebut dengan cara melakukan perhitungan manual. Perhitungan parameter-parameter tipikal 1A dijabarkan sebagai berikut:

a. Rele 69

Manufaktur	: AREVA
Model	: MiCOM P139
Kurva	: IEC Extreamly Inverse
Rasio CT	: 150/5
Isc min Bus	: 12,87 kA
FLA Motor	: 100,2 A
LRC Motor	: 650 %
I Starting Motor	: 651.3 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Motor} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Motor}$$

$$1,05 \times 100,2 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 100,2$$

$$105,21 < I_{\text{set}} < 140,28$$

$$\frac{105,21}{150} I_n < \text{Tap} < \frac{140,28}{150} I_n$$

$$0,7014 < \text{Tap} < 0,9352$$

Dipilih Tap 0.8 (*Range* 0,1 – 4 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 0,8 \times 150 = 120 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = waktu *starting* motor = 7 detik

$$t = \frac{80}{\left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]} \times k$$

$$t = \frac{80}{\left[\left(\frac{1,3 \times I_{\text{starting motor}}}{I_{\text{set}}} \right)^2 - 1 \right]} \times k$$

$$k = \frac{t \times \left[\left(\frac{1,3 \times I_{\text{starting motor}}}{I_{\text{set}}} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$k = \frac{7 \times \left[\left(\frac{1,3 \times 651,3}{120} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$k = 4,27$$

Dipilih k atau *time dial* = 4,5

Instantaneous Pickup

$$LRC < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc min}}$$

$$651,3 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 12870$$

$$651,3 < I_{\text{set}} < 10296$$

$$\frac{651,3}{150} In < \text{Tap} < \frac{10296}{150} In$$

$$4,342 < \text{Tap} < 68,64$$

Dipilih Tap 5 (*Range* 0,1 – 40 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 8 \times 150 = 750 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

b. Rele 27

Manufaktur	: AREVA
Model	: MiCOM P121
Kurva	: IEC Standard Inverse
Rasio CT	: 600/5
Isc Kontribusi SWGR – 3A	: 38,64 kA
Isc min	: 12,87 kA
FLA Total	: 320,68 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Total} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Total}$$

$$1,05 \times 320,68 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 320,68$$

$$336,714 < I_{\text{set}} < 448,952$$

$$\frac{336,714}{600} In < \text{Tap} < \frac{448,952}{600} In$$

$$0,5612 < \text{Tap} < 0,7483$$

Dipilih Tap 0,6 (*Range* 0,1 – 25 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 0,6 \times 600 = 360 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times k$$

$$k = \frac{t \times \left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$k = \frac{0,3 \times \left[\left(\frac{38640}{12870} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$k = 0,2$$

Dipilih k atau *time dial* = 1,5

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Total} < I_{\text{set}} < 0,8 \times \text{Isc min}$$

$$1,6 \times 320,68 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 12870$$

$$513,08 < I_{\text{set}} < 10296$$

$$\frac{513,08}{600} In < \text{Tap} < \frac{10296}{600} In$$

$$0,855 < \text{Tap} < 17,16$$

Dipilih Tap 10,71 (*Range* 0,5 – 40 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 10,71 \times 600 = 6426 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,3 detik

c. Rele 3

Manufaktur	: AREVA
Model	: MiCOM P121
Kurva	: IEC Extreamly Inverse
Rasio CT	: 3000/5
Isc Kontribusi PTHA - 011	: 14,86 kA
Isc min Bus SWGR – 3A	: 12,87 kA

FLA Sekunder Trafo : 1506 A

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \times \text{FLA Sekunder Trafo} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Sekunder Trafo}$

$1,05 \times 1506 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 1506$

$1581,3 < I_{\text{set}} < 2108,4$

$\frac{1581,3}{3000} In < \text{Tap} < \frac{2108,4}{3000} In$

$0,5271 < \text{Tap} < 0,7028$

Dipilih Tap 0,56 (Range 0,1 – 25 dengan step 0,01)

$I_{\text{set}} = 0,56 \times 3000 = 1680 \text{ A}$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,5 detik

$$t = \frac{80}{\left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]} \times k$$

$$k = \frac{t \times \left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$k = \frac{0,55 \times \left[\left(\frac{14860}{1680}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$k = 0,483$

Dipilih k atau *time dial* = 0,5

Instantaneous Pickup

$1,6 \times \text{FLA Sekunder Trafo} < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc min}}$

$1,6 \times 1506 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 12870$

$2409,6 < I_{\text{set}} < 10296$

$\frac{2409,6}{3000} In < \text{Tap} < \frac{10296}{3000} In$

$0,803 < \text{Tap} < 3,432$

Dipilih Tap 1,98 (Range 0,5 – 40 dengan step 0,01)

$I_{\text{set}} = 1,98 \times 3000 = 5940 \text{ A}$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,5 detik

d. Rele 87

Manufaktur	: AREVA
Model	: MiCOM P121
Kurva	: IEC Extremely Inverse
Rasio CT	: 1200/5
Isc min bus 9	: 12601 kA (27 kV)
Isc kontribusi	: 14,86 kA (13,8 kV)
Konversi ke <i>high voltage</i>	: $\frac{13,8}{27} \times 14,86 = 7,59511$ kA
FLA Primer Trafo	: 769,8 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Primer Trafo} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Primer Trafo}$$

$$1,05 \times 769,8 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 769,8$$

$$808,29 < I_{\text{set}} < 1077,72$$

$$\frac{808,29}{1200} I_n < \text{Tap} < \frac{1077,72}{1200} I_n$$

$$0,674 < \text{Tap} < 0,898$$

Dipilih Tap 0,7 (*Range* 0,1 – 25 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 0,7 \times 1200 = 840 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (*t*) = 0,15 detik

$$t = \frac{80}{\left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]} \times k$$

$$k = \frac{t \times \left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$k = \frac{0,15 \times \left[\left(\frac{7595,11}{840}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$k = 0,16$$

Dipilih *k* atau *time dial* = 0,725

Instantaneous Pickup

$$I_{\text{sc max bus SWGR}} - 3A \times \frac{kV \text{ sekunder}}{kV \text{ primer}} < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc min}}$$

$$39,79 \times \frac{13,8}{27} < I_{\text{set}} < 0,8 \times 12601000$$

$$20,33 < I_{\text{set}} < 10080800$$

$$\frac{20,33}{1200} In < \text{Tap} < \frac{10080800}{1200} In$$

$$0,017 < \text{Tap} < 8400,67$$

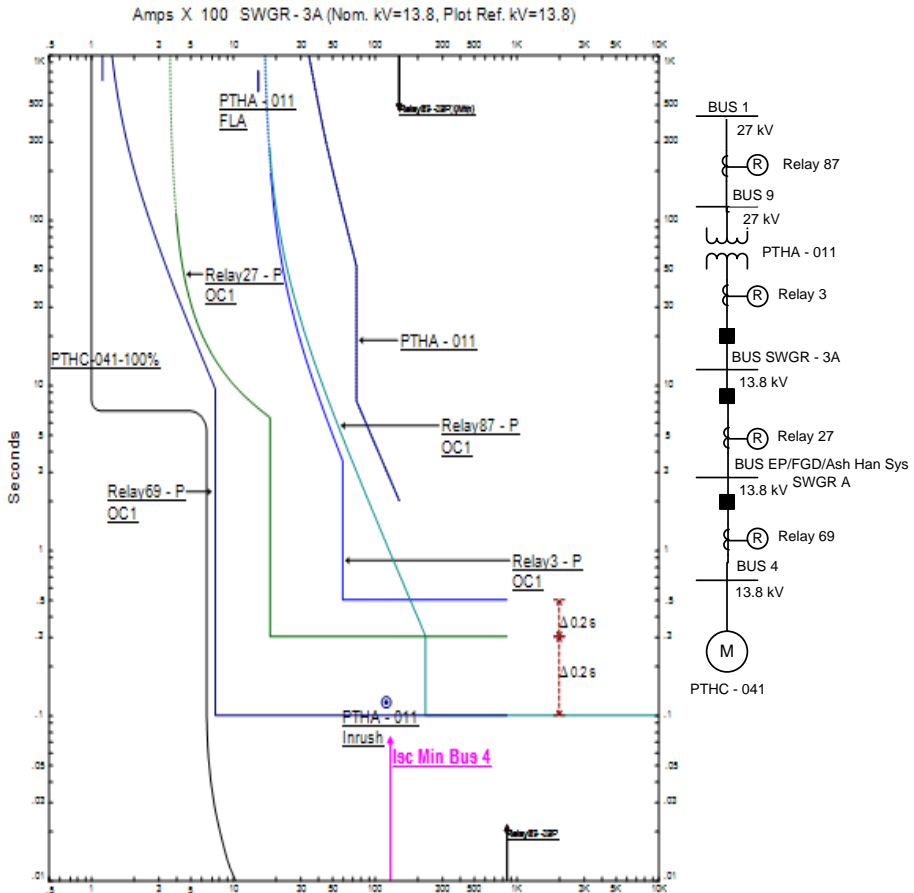
Dipilih Tap 9,71 (*Range* 0,5 – 40 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 9,71 \times 1200 = 11652 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik, karena memenuhi syarat nilai *Isc max* bus SWGR -3A lebih kecil dari pada *Isc min* bus 9.

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, didapatkan kurva pengaman tipikal 1A yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 berikut:



Gambar 4.5 Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 1A

Setelah melakukan plot kurva pengaman, dilakukan evaluasi koordinasi proteksi hasil *resetting*. Gambar 4.6 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat maksimum 0,5 cycle tiga fasa dan gangguan terletak pada bus 4 (motor PTHC – 041), sedangkan Gambar 4.7 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat minimum 30 cycle dua fasa dan gangguan terletak pada bus 4 (motor PTHC – 041).

3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus4					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-01-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay69	52.025	100		Phase - OC1 - 50
170	CB67		70.0		Tripped by Relay69 Phase - OC1 - 50
300	Relay27	50.802	300		Phase - OC1 - 50
370	CB25		70.0		Tripped by Relay27 Phase - OC1 - 50
500	Relay3	14.86	500		Phase - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 50
718	Relay87	7.595	718		Phase - OC1 - 51
788	CB_02		70.0		Tripped by Relay87 Phase - OC1 - 51

Gambar 4. 6 Sequence Viewer 0,5 Cycle Tipikal 1A

Line-to-Line (Symmetrical) fault on bus: Bus4					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-01-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay69	12.869	100		Phase - OC1 - 50
170	CB67		70.0		Tripped by Relay69 Phase - OC1 - 50
300	Relay27	12.869	300		Phase - OC1 - 50
370	CB25		70.0		Tripped by Relay27 Phase - OC1 - 50
500	Relay3	12.869	500		Phase - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 50
718	Relay87	7.595	718		Phase - OC1 - 51
788	CB_02		70.0		Tripped by Relay87 Phase - OC1 - 51

Gambar 4. 7 Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 1A

Sedangkan perhitungan parameter-parameter untuk Tipikal 1B sebagai berikut:

a. Rele 86

Manufaktur	: AREVA
Model	: MiCOM P139
Kurva	: IEC Normal Inverse
Rasio CT	: 1200/5
Isc Kontribusi Grid PLN	: 47,62 kA (525 kV)
Isc min	: 41,24 kA (525 kV)
Isc max Bus 1	: 14547 kA (27 kV)
Konversi ke <i>high voltage</i>	: $\frac{27}{525} \times 14547 = 748,131 \text{ kA}$

FLA Primer Trafo

: 1109 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Primer Trafo} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Primer Trafo}$$

$$1,05 \times 1109 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 1109$$

$$1164,45 < I_{\text{set}} < 1552,6$$

$$\frac{1164,45}{1200} In < \text{Tap} < \frac{1552,6}{1200} In$$

$$0,970 < \text{Tap} < 1,294$$

Dipilih Tap 1,1 (*Range* 0,1 – 4 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 1,1 \times 1200 = 1320 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,35 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times k$$

$$k = \frac{t \times \left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$k = \frac{0,35 \times \left[\left(\frac{47620}{1320} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$k = 0,19$$

Dipilih k atau *time dial* = 0,19

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Primer Trafo} < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc min}}$$

$$1,6 \times 1109 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 41240$$

$$1774,4 < I_{\text{set}} < 32992$$

$$\frac{1774,4}{1200} In < \text{Tap} < \frac{32992}{1200} In$$

$$1,479 < \text{Tap} < 27,49$$

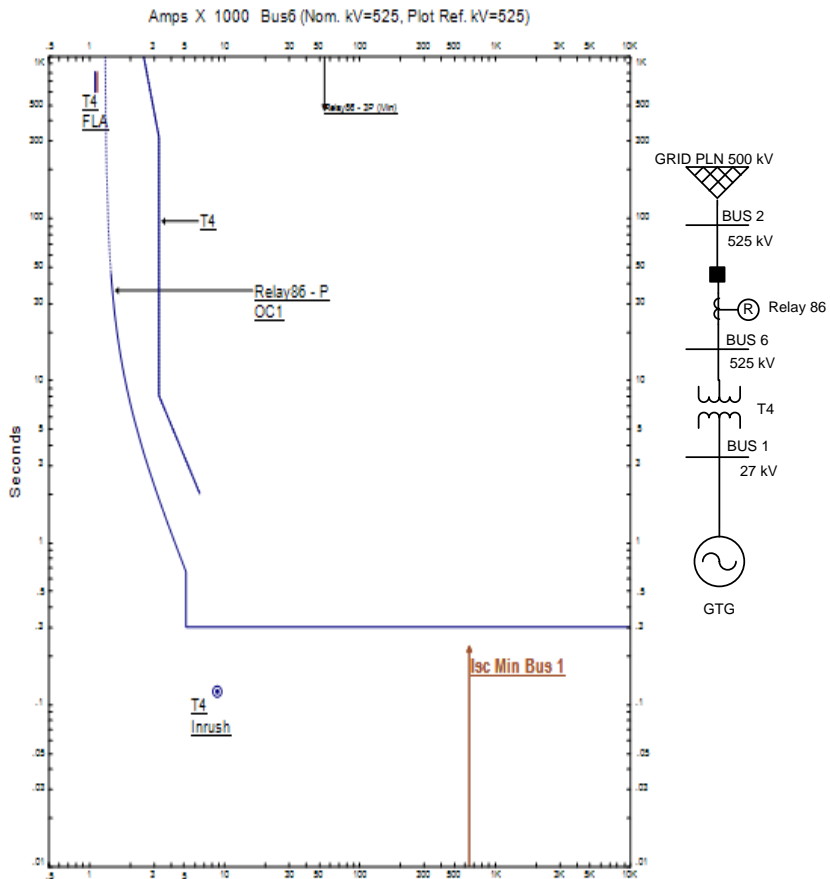
Dipilih Tap 4,34 (*Range* 0,1 – 40 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 4,34 \times 1200 = 5208 \text{ A}$$

Time Delay

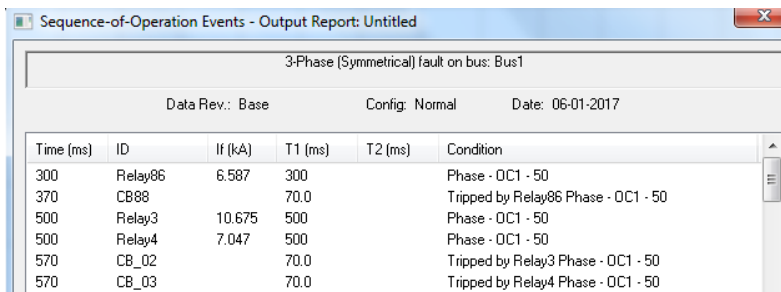
Dipilih *Time Delay* 0,3 detik

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, didapatkan kurva pengaman tipikal 1B yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 berikut:



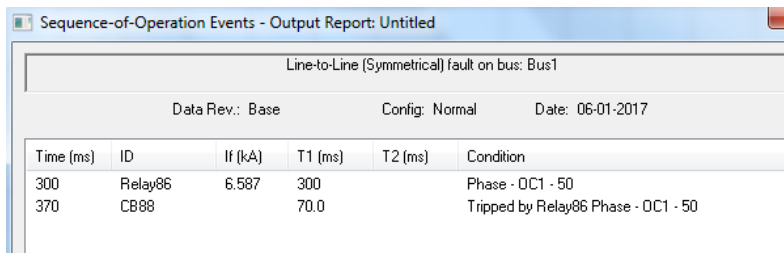
Gambar 4. 8 Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 1B

Setelah melakukan plot kurva pengaman, dilakukan evaluasi koordinasi proteksi hasil *resetting*. Gambar 4.9 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat maksimum 0.5 cycle tiga fasa dan gangguan terletak pada bus 1, sedangkan Gambar 4.10 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat minimum 30 cycle dua fasa dan gangguan terletak pada bus 1.



3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus1					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-01-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
300	Relay86	6.587	300		Phase - OC1 - 50
370	CB88		70.0		Tripped by Relay86 Phase - OC1 - 50
500	Relay3	10.675	500		Phase - OC1 - 50
500	Relay4	7.047	500		Phase - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 50
570	CB_03		70.0		Tripped by Relay4 Phase - OC1 - 50

Gambar 4. 9 *Sequence Viewer 0,5 Cycle* Tipikal 1B



Line-to-Line (Symmetrical) fault on bus: Bus1					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-01-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
300	Relay86	6.587	300		Phase - OC1 - 50
370	CB88		70.0		Tripped by Relay86 Phase - OC1 - 50

Gambar 4. 10 *Sequence Viewer 30 Cycle* Tipikal 1B

Dengan hasil perhitungan dan plot TCC di atas, maka data *resetting* tipikal 1A dan tipikal 1B dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 *Data Resetting Rele* Tipikal 1A dan 1B

ID Rele	Setting	Existing	Resetting
69	Overcurrent	IEC - LTI	IEC - EI
	Pickup	0,91	0,8
	Time Dial	0,01	4,5

Tabel 4.4 Data Resetting Rele Tipikal 1A dan 1B (lanjutan)

ID Rele	Setting	Existing	Resetting
69	<i>Instantaneous</i>		
	<i>Pickup</i>	8	5
	<i>Time Delay</i>	-	0,1
27	<i>Overcurrent</i>	IEC - VI	IEC - SI
	<i>Pickup</i>	0,83	0,6
	<i>Time Dial</i>	1,5	1,5
	<i>Instantaneous</i>		
	<i>Pickup</i>	7	10,71
	<i>Time Delay</i>	0,3	0,3
3	<i>Overcurrent</i>	IEC - EI	IEC - EI
	<i>Pickup</i>	0,83	0,56
	<i>Time Dial</i>	0,3	0,5
	<i>Instantaneous</i>		
	<i>Pickup</i>	4	1,98
	<i>Time Delay</i>	0,8	0,5
87	<i>Overcurrent</i>	IEC - EI	IEC - EI
	<i>Pickup</i>	0,7	0,7
	<i>Time Dial</i>	0,5	0,725
	<i>Instantaneous</i>		
	<i>Pickup</i>	8	9,71
	<i>Time Delay</i>	0,1	0,1
86	<i>Overcurrent</i>	IEC - EI	IEC - EI
	<i>Pickup</i>	0,8	1,1
	<i>Time Dial</i>	10	0,19
	<i>Instantaneous</i>		
	<i>Pickup</i>	2,09	4,34
	<i>Time Delay</i>	0,11	0,3

Dari seluruh koordinasi tipikal 1A dan tipikal 1B ketika diberi gangguan pada bus 9, maka *sequence viewer* dapat dilihat pada Gambar 4.11 untuk 0,5 cycle dan Gambar 4.12 untuk 30 cycle.

3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus9					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-01-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay87	14543	100		Phase - OC1 - 50
170	CB_02		70.0		Tripped by Relay87 Phase - OC1 - 50
300	Relay86	6.587	300		Phase - OC1 - 50
370	CB88		70.0		Tripped by Relay86 Phase - OC1 - 50
500	Relay3	10.675	500		Phase - OC1 - 50
500	Relay4	7.047	500		Phase - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 50

Gambar 4.11 *Sequence Viewer 0,5 Cycle* Tipikal 1

Line-to-Line (Symmetrical) fault on bus: Bus9					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-01-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay87	12600	100		Phase - OC1 - 50
170	CB_02		70.0		Tripped by Relay87 Phase - OC1 - 50
300	Relay86	6.587	300		Phase - OC1 - 50
370	CB88		70.0		Tripped by Relay86 Phase - OC1 - 50

Gambar 4.12 *Sequence Viewer 30 Cycle* Tipikal 1

Dari keseluruhan analisa gangguan yang terjadi pada tipikal 1 baik gangguan 0,5 cycle 3 fasa maupun 30 cycle 2 fasa dapat terlihat bahwa koordinasi dari seluruh tipikal 1 sudah benar, baik dari plot TCC hingga urutan sensing rele. Untuk mempermudah melihat urutan sensing rele pada keseluruhan tipikal 1 dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Urutan Sensing Tipikal 1

Letak Gangguan	Rele	0,5 Cycle		30 Cycle	
		Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele	Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele
Bus 4	69	100	50	100	50
	27	300	50	300	50
	3	500	50	500	50

Tabel 4.5 Urutan Sensing Tipikal 1 (lanjutan)

Letak Gangguan	Rele	0,5 Cycle		30 Cycle	
		Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele	Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele
Bus 4	87	718	51	718	51
Bus 9	87	100	50	100	50
	86	300	50	300	50
	3	500	50	-	-
	4	500	50	-	-
Bus 1	86	300	50	300	50
	3	500	50	-	-
	4	500	50	-	-

4.4.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 2

Koordinasi rele arus lebih tipikal 2 adalah koordinasi rele dari beban PTHD – 041 hingga trafo *step-up* T4. Untuk memudahkan analisa maka tipikal 2 dibagi menjadi tipikal 2A dan 2B. Pada tipikal 2A terdapat rele 55, rele 24, rele 3, dan rele 87, sedangkan pada tipikal 2B terdapat rele 86. Koordinasi tipikal 2 ditunjukkan pada Gambar 4.13 sedangkan kondisi *existing* pada koordinasi tipikal 2A ditunjukkan Gambar 4.14 dan kondisi *existing* pada koordinasi tipikal 2B ditunjukkan Gambar 4.15. *Setting* dari rele pada kondisi *existing* dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Data *Existing* Rele Tipikal 2A dan 2B

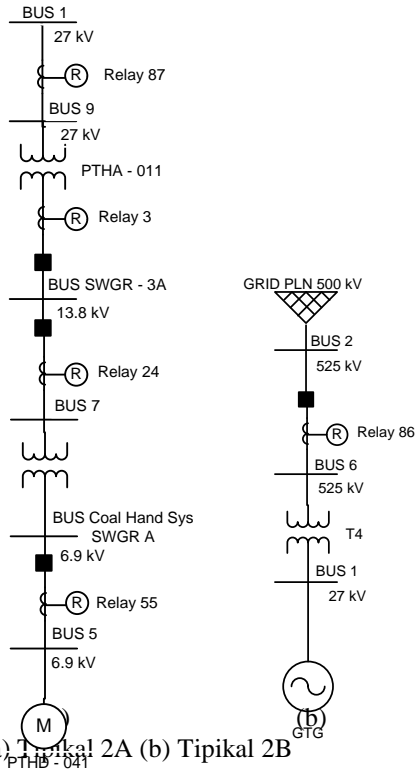
ID rele	CT Ratio	Setting	
55	75/5	Curve Type	IEC - LTI
		<i>Overcurrent</i>	
		Pickup Range × CT Sec,	0,1-4
		Pickup Lowset	0,85
		Time Dial	0,01

Tabel 4.6 Data Existing Rele Tipikal 2A dan 2B (lanjutan)

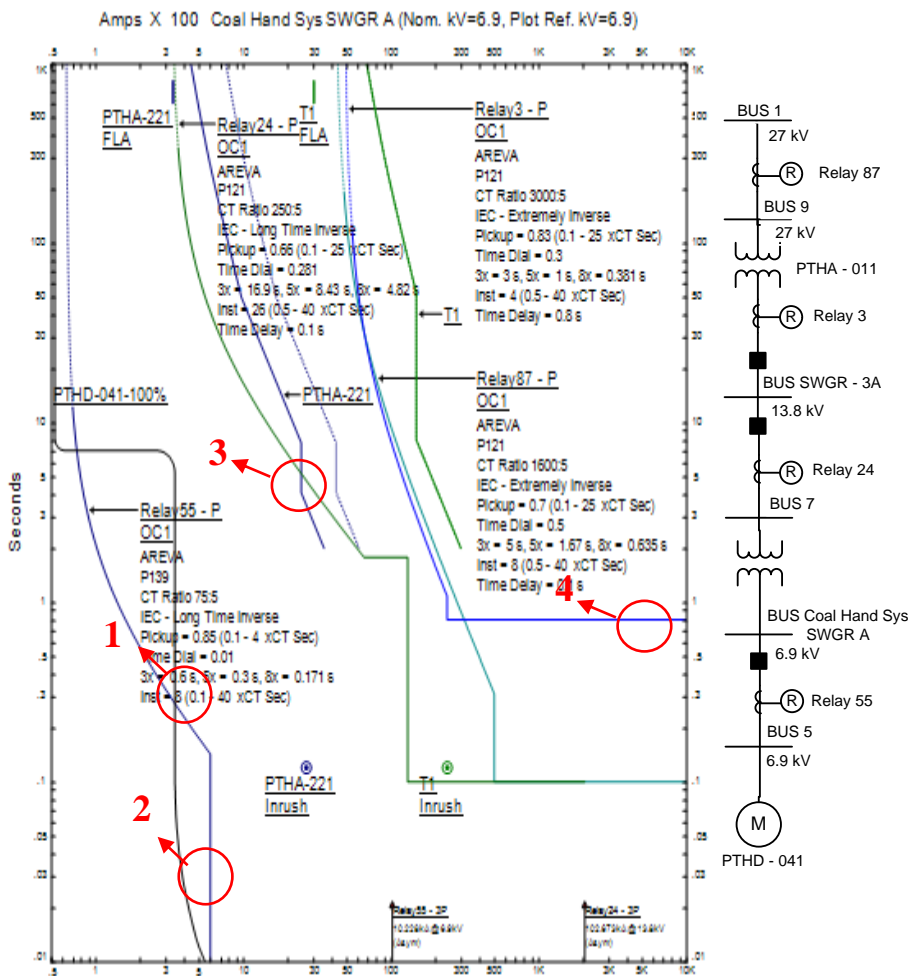
<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	
55	75/5	<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,1-40
		<i>Pickup Highset</i>	8
		<i>Time Delay</i>	-
24	250/5	<i>Curve Type</i>	IEC - LTI
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,1-25
		<i>Pickup Lowset</i>	0,66
		<i>Time Dial</i>	0,281
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,5-40
		<i>Pickup Highset</i>	26
		<i>Time Delay</i>	0,1
3	3000/5	<i>Curve Type</i>	IEC - EI
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,1-25
		<i>Pickup Lowset</i>	0,83
		<i>Time Dial</i>	0,3
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,5-40
		<i>Pickup Highset</i>	4
		<i>Time Delay</i>	0,8
87	1200/5	<i>Curve Type</i>	IEC - EI
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,1-25
		<i>Pickup Lowset</i>	0,7

Tabel 4.6 Data Existing *Rele Tipikal 2A dan 2B (lanjutan)*

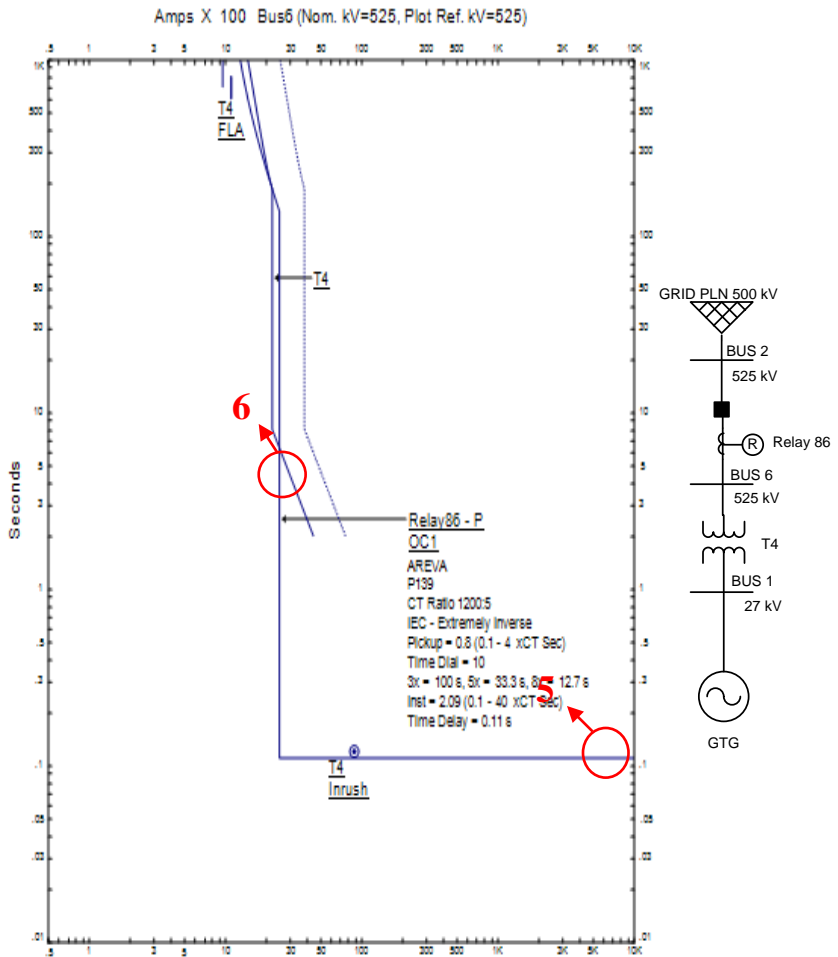
<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	
87	1200/5	<i>Time Dial</i>	0,5
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,5-40
		<i>Pickup Highset</i>	8
		<i>Time Delay</i>	0,1
86	1200/5	<i>Curve Type</i>	IEC - EI
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,1-4
		<i>Pickup Lowset</i>	0,8
		<i>Time Dial</i>	10
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,1-40
		<i>Pickup Highset</i>	2,09
		<i>Time Delay</i>	0,11



Gambar 4.13 (a) Tipikal 2A (b) Tipikal 2B



Gambar 4. 14 Plot Kurva Pengaman *Existing* Tipikal 2A



Gambar 4. 15 Plot Kurva Pengaman *Existing* Tipikal 2B

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 2A dan 2B, terlihat masih ada beberapa koordinasi yang kurang tepat, yaitu :

1. Pada lingkaran nomor 1, kurva *invers* rele 55 masih menyentuh kurva *starting* motor, sehingga *starting* motor terganggu sementara, namun tidak menghentikan kerja motor.

2. Pada lingkaran nomor 2, kurva *instantaneous* rele 55 tidak mempunyai *delay* hal ini tidak sesuai dengan standar IEEE 242.
3. Pada lingkaran nomor 3, kurva *invers* dari rele 24 menyentuh *damage curve* dari trafo PTHA-221.
4. Pada lingkaran nomor 4, *time delay* antar rele tidak sesuai standar yaitu bukan dalam *range* 0,2 – 0,4 detik.
5. Pada lingkaran nomor 5, *time delay* berada pada 0.13 detik, hal ini tidak sesuai dengan standar. Seharusnya rele ini bekerja dengan *time delay* 0,3 detik.
6. Pada lingkaran nomor 6, kurva *instantaneous* dari rele 86 menyentuh *damage curve* dari trafo T4.

Maka dari itu, perlu dilakukan *resetting* untuk memperbaiki koordinasi pengaman pada tipikal tersebut dengan cara melakukan perhitungan manual. Perhitungan parameter-parameter tipikal 2A dijabarkan sebagai berikut:

a. Rele 55

Manufaktur	: AREVA
Model	: MiCOM P139
Kurva	: IEC Extreamly Inverse
Rasio CT	: 75/5
Isc min Bus	: 4,38 kA
FLA Motor	: 53,02 A
LRC Motor	: 650 %
I Starting Motor	: 344,63 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Motor} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Motor}$$

$$1,05 \times 53,02 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 53,02$$

$$55,671 < I_{\text{set}} < 74,228$$

$$\frac{55,671}{75} In < \text{Tap} < \frac{74,228}{75} In$$

$$0,742 < \text{Tap} < 0,9897$$

Dipilih Tap 0,8 (*Range* 0,1 – 4 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 0,8 \times 75 = 60 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = waktu *starting* motor = 7 detik

$$t = \frac{80}{\left[\left(\frac{1}{I_{set}}\right)^2 - 1\right]} \times k$$
$$t = \frac{80}{\left[\left(\frac{1,3 \times I_{starting\ motor}}{I_{set}}\right)^2 - 1\right]} \times k$$
$$k = \frac{t \times \left[\left(\frac{1,3 \times I_{starting\ motor}}{I_{set}}\right)^2 - 1\right]}{80}$$
$$k = \frac{7 \times \left[\left(\frac{1,3 \times 344,63}{60}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$k = 4,79$$

Dipilih k atau *time dial* = 4,79

Instantaneous Pickup

$$LRC < I_{set} < 0,8 \times I_{sc\ min}$$

$$344,63 < I_{set} < 0,8 \times 4380$$

$$344,63 < I_{set} < 3504$$

$$\frac{344,63}{75} In < Tap < \frac{3504}{75} In$$

$$4,595 < Tap < 46,720$$

Dipilih Tap 5,21 (*Range* 0,1 – 40 dengan *step* 0,01)

$$I_{set} = 5,21 \times 75 = 390,75\ A$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

b. Rele 24

Manufaktur	: AREVA
Model	: MiCOM P121
Kurva	: IEC Extreamly Inverse
Rasio CT	: 250 / 5
Isc min bus 7	: 12,87 kA (13,8 kV)
Isc kontribusi bus	: 5,65 kA (6,9 kV)
Coal Hand Sys SWGR A	

$$\begin{aligned} \text{Konversi ke } high \text{ voltage} &: \frac{6,9}{13,8} \times 5,65 = 2,825 \text{ kA} \\ \text{FLA Primer Trafo} &: 167,3 \text{ A} \end{aligned}$$

Time Overcurrent Pickup

$$\begin{aligned} 1,05 \times \text{FLA Primer Trafo} &< I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Primer Trafo} \\ 1,05 \times 167,3 &< I_{\text{set}} < 1,4 \times 167,3 \\ 175,665 &< I_{\text{set}} < 234,22 \\ \frac{175,665}{250} In &< \text{Tap} < \frac{234,22}{250} In \\ 0,703 &< \text{Tap} < 0,937 \end{aligned}$$

Dipilih Tap 0,8 (*Range* 0,1 – 25 dengan *step* 0,01)
 $I_{\text{set}} = 0,8 \times 250 = 200 \text{ A}$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,18 detik

$$\begin{aligned} t &= \frac{80}{\left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]} \times k \\ k &= \frac{t \times \left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]}{80} \\ k &= \frac{0,11 \times \left[\left(\frac{2825}{200}\right)^{0,02} - 1\right]}{0,14} \end{aligned}$$

$$k = 0,45$$

Dipilih k atau *time dial* = 0,775

Instantaneous Pickup

$$I_{\text{sc max bus Coal Hand Sys SWGR A}} \times \frac{kV \text{ sekunder}}{kV \text{ primer}} < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc}}$$

min

$$\begin{aligned} 6,08 \times \frac{6,9}{13,8} &< I_{\text{set}} < 0,8 \times 12870 \\ 3040 &< I_{\text{set}} < 10296 \\ \frac{3040}{250} In &< \text{Tap} < \frac{10296}{250} In \\ 12,16 &< \text{Tap} < 41,184 \end{aligned}$$

Dipilih Tap 30 (*Range* 0,5 – 40 dengan *step* 0,01)
 $I_{\text{set}} = 30 \times 250 = 7500 \text{ A}$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik, karena memenuhi syarat nilai $I_{sc \max}$ bus Coal Hand Sys SWGR A lebih kecil dari pada $I_{sc \min}$ bus SWGR – 3A,

c. Rele 3

Manufaktur	: AREVA
Model	: MiCOM P121
Kurva	: IEC Extremely Inverse
Rasio CT	: 3000/5
I_{sc} Kontribusi PTHA - 011	: 14,86 kA
$I_{sc \min}$ Bus SWGR – 3A	: 12,87 kA
FLA Sekunder Trafo	: 1506 A

Time Overcurrent Pickup

$1,05 \times \text{FLA Sekunder Trafo} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Sekunder Trafo}$

$1,05 \times 1506 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 1506$

$1581,3 < I_{\text{set}} < 2108,4$

$\frac{1581,3}{3000} In < \text{Tap} < \frac{2108,4}{3000} In$

$0,5271 < \text{Tap} < 0,7028$

Dipilih Tap 0,56 (*Range* 0,1 – 25 dengan *step* 0,01)

$I_{\text{set}} = 0,56 \times 3000 = 1680 \text{ A}$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,5 detik

$$t = \frac{80}{\left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]} \times k$$

$$k = \frac{t \times \left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$k = \frac{0,55 \times \left[\left(\frac{14860}{1680}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$k = 0,483$$

Dipilih k atau *time dial* = 0,5

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Sekunder Trafo} < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc min}}$$

$$1,6 \times 1506 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 12870$$

$$2409,6 < I_{\text{set}} < 10296$$

$$\frac{2409,6}{3000} I_n < \text{Tap} < \frac{10296}{3000} I_n$$

$$0,803 < \text{Tap} < 3,432$$

Dipilih Tap 1,98 (*Range* 0,5 – 40 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 1,98 \times 3000 = 5940 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,5 detik

d. Rele 87

Manufaktur	: AREVA
Model	: MiCOM P121
Kurva	: IEC Extreamly Inverse
Rasio CT	: 1200/5
I _{sc} min bus 9	: 12601 kA (27 kV)
I _{sc} kontribusi	: 14,86 kA (13,8 kV)
Konversi ke <i>high voltage</i>	: $\frac{13,8}{27} \times 14,86 = 7,59511 \text{ kA}$
FLA Primer Trafo	: 769,8 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Primer Trafo} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Primer Trafo}$$

$$1,05 \times 769,8 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 769,8$$

$$808,29 < I_{\text{set}} < 1077,72$$

$$\frac{808,29}{1200} I_n < \text{Tap} < \frac{1077,72}{1200} I_n$$

$$0,674 < \text{Tap} < 0,898$$

Dipilih Tap 0,7 (*Range* 0,1 – 25 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 0,7 \times 1200 = 840 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,15 detik

$$t = \frac{80}{\left[\left(\frac{1}{I_{set}}\right)^2 - 1\right]} \times k$$

$$k = \frac{t \times \left[\left(\frac{1}{I_{set}}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$k = \frac{0,15 \times \left[\left(\frac{7595,11}{840}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$k = 0,16$$

Dipilih k atau *time dial* = 0,725

Instantaneous Pickup

$$I_{sc \text{ max bus SWGR}} - 3A \times \frac{kV \text{ sekunder}}{kV \text{ primer}} < I_{set} < 0,8 \times I_{sc \text{ min}}$$

$$39,79 \times \frac{13,8}{27} < I_{set} < 0,8 \times 12601000$$

$$20,33 < I_{set} < 10080800$$

$$\frac{20,33}{1200} In < Tap < \frac{10080800}{1200} In$$

$$0,017 < Tap < 8400,67$$

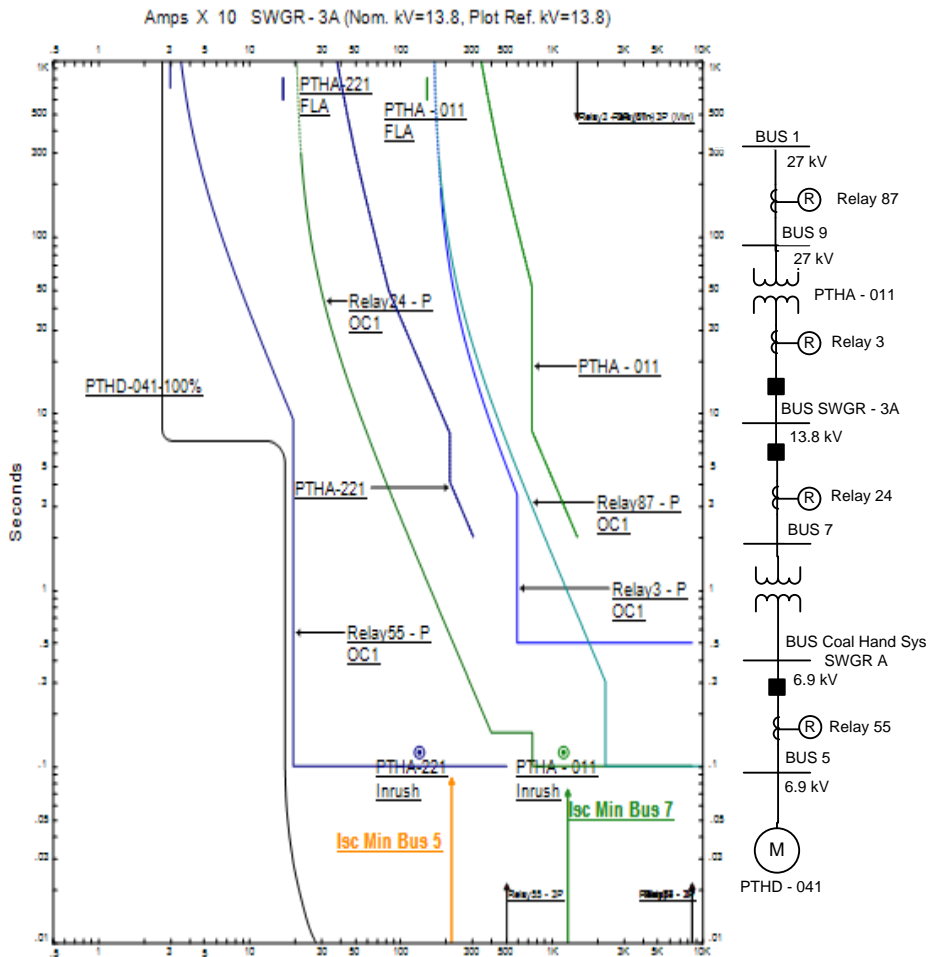
Dipilih Tap 9,71 (*Range* 0,5 – 40 dengan *step* 0,01)

$$I_{set} = 9,71 \times 1200 = 11652 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik, karena memenuhi syarat nilai *I_{sc} max bus SWGR -3A* lebih kecil dari pada *I_{sc} min bus 9*.

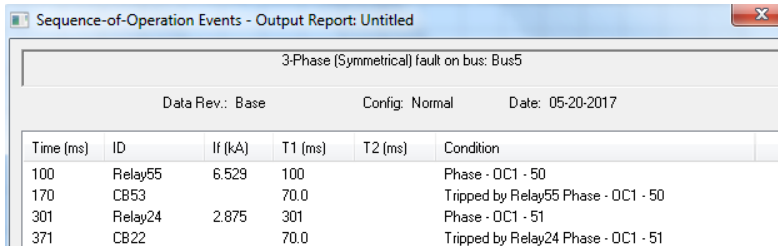
Berdasarkan hasil perhitungan di atas, didapatkan kurva pengaman tipikal 2A yang ditunjukkan pada Gambar 4.16 berikut:



Gambar 4. 16 Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 2A

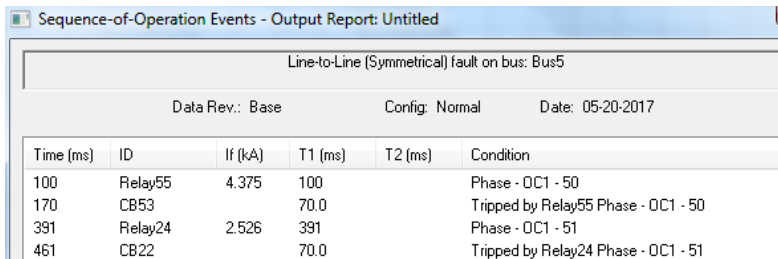
Setelah melakukan plot kurva pengaman, dilakukan evaluasi koordinasi proteksi hasil *resetting*. Gambar 4.17 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat maksimum 0,5 cycle tiga fasa dan gangguan terletak pada bus 5 (motor PTHD – 041), sedangkan Gambar 4.18 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada

saat hubung singkat minimum 30 *cycle* dua fasa dan gangguan terletak pada bus 5 (motor PTHD – 041).



3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus5					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 05-20-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay55	6.529	100		Phase - OC1 - 50
170	CB53		70.0		Tripped by Relay55 Phase - OC1 - 50
301	Relay24	2.875	301		Phase - OC1 - 51
371	CB22		70.0		Tripped by Relay24 Phase - OC1 - 51

Gambar 4. 17 *Sequence Viewer 0,5 Cycle* Tipikal 2A (*Case 1*)



Line-to-Line (Symmetrical) fault on bus: Bus5					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 05-20-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay55	4.375	100		Phase - OC1 - 50
170	CB53		70.0		Tripped by Relay55 Phase - OC1 - 50
391	Relay24	2.526	391		Phase - OC1 - 51
461	CB22		70.0		Tripped by Relay24 Phase - OC1 - 51

Gambar 4. 18 *Sequence Viewer 30 Cycle* Tipikal 2A (*Case 1*)

Evaluasi hasil koordinasi pengaman *resetting* dilakukan lagi dengan membuat gangguan pada bus setelah trafo PTHA – 221 yaitu bus 7. Gambar 4.19 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* pada saat 0,5 *cycle*, sedangkan Gambar 4.20 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* pada saat 30 *cycle*.

Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled					
3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus7					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 05-20-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay24	52.248	100		Phase - OC1 - 50
170	CB22		70.0		Tripped by Relay24 Phase - OC1 - 50
300	Relay27	1.904	300		Phase - OC1 - 50
370	CB25		70.0		Tripped by Relay27 Phase - OC1 - 50
500	Relay3	14.86	500		Phase - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 50
718	Relay87	7.595	718		Phase - OC1 - 51
788	CB_02		70.0		Tripped by Relay87 Phase - OC1 - 51

Gambar 4. 19 *Sequence Viewer 0,5 Cycle Tipikal 2A (Case 2)*

Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled					
Line-to-Line (Symmetrical) fault on bus: Bus7					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 05-20-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay24	12.869	100		Phase - OC1 - 50
170	CB22		70.0		Tripped by Relay24 Phase - OC1 - 50
500	Relay3	12.869	500		Phase - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 50
718	Relay87	7.595	718		Phase - OC1 - 51
788	CB_02		70.0		Tripped by Relay87 Phase - OC1 - 51

Gambar 4. 20 *Sequence Viewer 30 Cycle (Case 2)*

Sedangkan perhitungan parameter-parameter untuk Tipikal 1B sebagai berikut:

a. Rele 86

Manufaktur	: AREVA
Model	: MiCOM P139
Kurva	: IEC Normal Inverse
Rasio CT	: 1200/5
Isc Kontribusi Grid PLN	: 47,62 kA (525 kV)
Isc min	: 41,24 kA (525 kV)
Isc max Bus 1	: 14547 kA (27 kV)
Konversi ke <i>high voltage</i>	: $\frac{27}{525} \times 14547 = 748,131$ kA
FLA Primer Trafo	: 1109 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Primer Trafo} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Primer Trafo}$$

$$1,05 \times 1109 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 1109$$

$$1164,45 < I_{\text{set}} < 1552,6$$

$$\frac{1164,45}{1200} I_n < \text{Tap} < \frac{1552,6}{1200} I_n$$

$$0,970 < \text{Tap} < 1,294$$

Dipilih Tap 1,1 (*Range* 0,1 – 4 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 1,1 \times 1200 = 1320 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,35 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times k$$

$$k = \frac{t \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$k = \frac{0,35 \times \left[\left(\frac{47620}{1320} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$k = 0,19$$

Dipilih k atau *time dial* = 0,19

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Primer Trafo} < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc min}}$$

$$1,6 \times 1109 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 41240$$

$$1774,4 < I_{\text{set}} < 32992$$

$$\frac{1774,4}{1200} I_n < \text{Tap} < \frac{32992}{1200} I_n$$

$$1,479 < \text{Tap} < 27,49$$

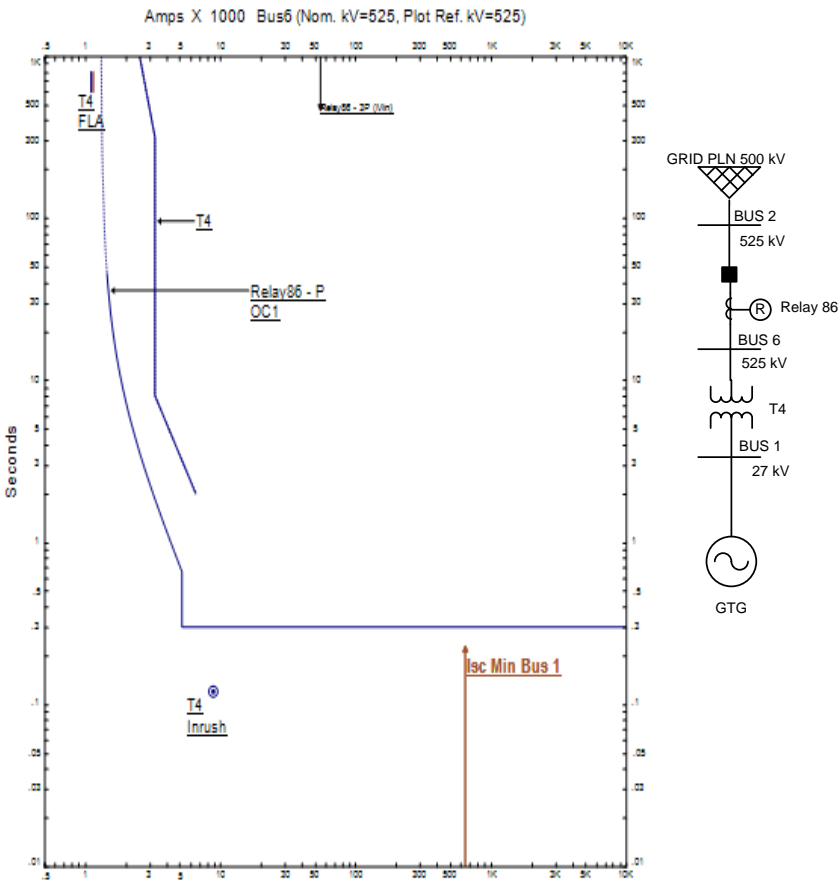
Dipilih Tap 4,34 (*Range* 0,1 – 40 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 4,34 \times 1200 = 5208 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,3 detik

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, didapatkan kurva pengaman tipikal 2B yang ditunjukkan pada Gambar 4.21 berikut:



Gambar 4. 21 Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 2B

Setelah melakukan plot kurva pengaman, dilakukan evaluasi koordinasi proteksi hasil *resetting*. Gambar 4.22 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat maksimum 0,5 cycle tiga fasa dan gangguan terletak

pada bus 1, sedangkan Gambar 4.23 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat minimum 30 cycle dua fasa dan gangguan terletak pada bus 1.

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
300	Relay86	6.587	300		Phase - OC1 - 50
370	CB88		70.0		Tripped by Relay86 Phase - OC1 - 50
500	Relay3	10.675	500		Phase - OC1 - 50
500	Relay4	7.047	500		Phase - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 50
570	CB_03		70.0		Tripped by Relay4 Phase - OC1 - 50

Gambar 4. 22 *Sequence Viewer 0,5 Cycle* Tipikal 2B

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
300	Relay86	6.587	300		Phase - OC1 - 50
370	CB88		70.0		Tripped by Relay86 Phase - OC1 - 50

Gambar 4. 23 *Sequence Viewer 30 Cycle* Tipikal 2B

Dengan hasil perhitungan dan plot TCC di atas, maka data *resetting* tipikal 2A dan tipikal 2B dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 *Data Resetting Rele* Tipikal 2A dan 2B

ID Rele	Setting	Existing	Resetting
55	Overcurrent	IEC - LTI	IEC - EI
	Pickup	0,85	0,8
	Time Dial	0,01	3,7
	Instantaneous		
	Pickup	8	5,21
	Time Delay	-	0,1
24	Overcurrent	IEC - LTI	IEC - EI
	Pickup	0,66	0,8

Tabel 4. 7 Data Resetting Rele Tipikal 2A dan 2B (lanjutan)

ID Rele	<i>Setting</i>	<i>Existing</i>	<i>Resetting</i>
24	<i>Time Dial</i>	0,281	0,775
	<i>Instantaneous</i>		
	<i>Pickup</i>	26	30
	<i>Time Delay</i>	0,1	0,1
3	<i>Overcurrent</i>	IEC - EI	IEC - EI
	<i>Pickup</i>	0,83	0,56
	<i>Time Dial</i>	0,3	0,5
	<i>Instantaneous</i>		
	<i>Pickup</i>	4	1,98
	<i>Time Delay</i>	0,8	0,5
87	<i>Overcurrent</i>	IEC - EI	IEC - EI
	<i>Pickup</i>	0,7	0,7
	<i>Time Dial</i>	0,5	0,725
	<i>Instantaneous</i>		
	<i>Pickup</i>	8	9,71
	<i>Time Delay</i>	0,1	0,1
86	<i>Overcurrent</i>	IEC - EI	IEC - EI
	<i>Pickup</i>	0,8	1,1
	<i>Time Dial</i>	10	0,19
	<i>Instantaneous</i>		
	<i>Pickup</i>	2,09	4,34
	<i>Time Delay</i>	0,11	0,3

Dari seluruh koordinasi tipikal 2A dan tipikal 2B ketika diberi gangguan pada bus 9, maka *sequence viewer* dapat dilihat pada Gambar 4.24 untuk 0,5 cycle dan Gambar 4.25 untuk 30 cycle.

3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus9					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-01-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay87	14543	100		Phase - OC1 - 50
170	CB_02		70.0		Tripped by Relay87 Phase - OC1 - 50
300	Relay86	6.587	300		Phase - OC1 - 50
370	CB88		70.0		Tripped by Relay86 Phase - OC1 - 50
500	Relay3	10.675	500		Phase - OC1 - 50
500	Relay4	7.047	500		Phase - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 50

Gambar 4. 24 *Sequence Viewer 0,5 Cycle* Tipikal 2

Line-to-Line (Symmetrical) fault on bus: Bus9					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-01-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay87	12500	100		Phase - OC1 - 50
170	CB_02		70.0		Tripped by Relay87 Phase - OC1 - 50
300	Relay86	6.587	300		Phase - OC1 - 50
370	CB88		70.0		Tripped by Relay86 Phase - OC1 - 50

Gambar 4. 25 *Sequence Viewer 30 Cycle* Tipikal 2

Dari keseluruhan analisa gangguan yang terjadi pada tipikal 2 baik gangguan 0,5 cycle 3 fasa maupun 30 cycle 2 fasa dapat terlihat bahwa koordinasi dari seluruh tipikal 2 sudah benar, baik dari plot TCC hingga urutan sensing rele. Untuk mempermudah melihat urutan sensing rele pada keseluruhan tipikal 2 dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Urutan Sensing Rele Tipikal 2

Letak Gangguan	Rele	0,5 Cycle		30 Cycle	
		Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele	Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele
Bus 5	55	100	50	100	50
	24	301	51	391	51
Bus 7	24	100	50	100	50

Tabel 4.8 Urutan Sensing Rele Tipikal 2 (lanjutan)

Letak Gangguan	Rele	0,5 Cycle		30 Cycle	
		Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele	Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele
Bus 7	27	300	50	-	-
	3	500	50	500	50
	87	718	51	718	51
Bus 9	87	100	50	100	50
	86	300	50	300	50
	3	500	50	-	-
	4	500	50	-	-
Bus 1	86	300	50	300	50
	3	500	50	-	-
	4	500	50	-	-

4.4.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Fasa Tipikal 3

Koordinasi rele arus lebih tipikal 3 adalah koordinasi rele dari beban PTHA – 171 hingga trafo *step-up* T4. Untuk memudahkan analisa maka tipikal 2 dibagi menjadi tipikal 3A dan 3B. Pada tipikal 3A terdapat rele 19, rele 3, dan rele 87, sedangkan pada tipikal 3B terdapat rele 86. Koordinasi tipikal 3 ditunjukkan pada Gambar 4.26 sedangkan kondisi *existing* pada koordinasi tipikal 2A ditunjukkan Gambar 4.27 dan kondisi *existing* pada koordinasi tipikal 2B ditunjukkan Gambar 4.28. *Setting* dari rele pada kondisi *existing* dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Data *Existing* Rele Tipikal 3A dan 3B

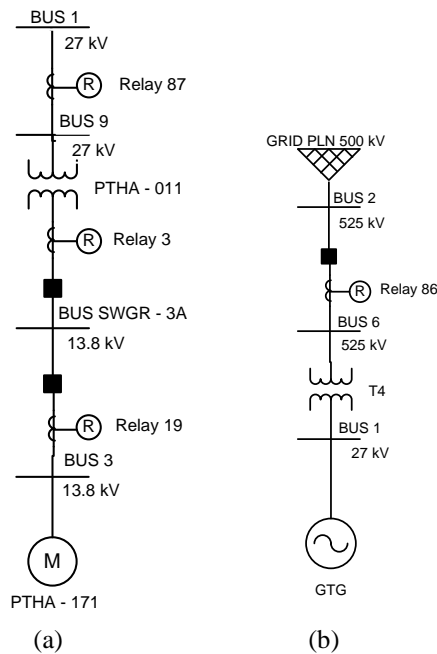
ID rele	CT Ratio	Setting	
19	600/5	Curve Type	IEC - LTI
		<i>Overcurrent</i>	
		Pickup Range \times CT Sec,	0,01-0,8
		Pickup Lowset	0,77
		Time Dial	0,01

Tabel 4.9 Data Existing Rele Tipikal 3A dan 3B (lanjutan)

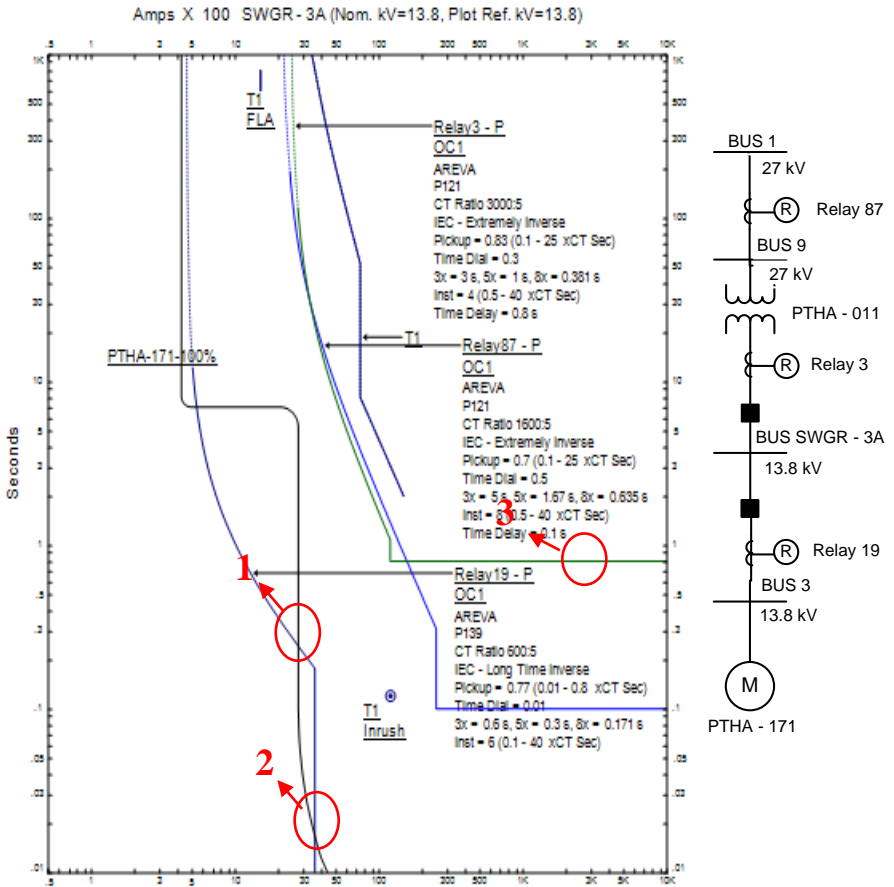
<i>ID rele</i>	<i>CT Ratio</i>	<i>Setting</i>	
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,1-40
		<i>Pickup Highset</i>	6
		<i>Time Delay</i>	-
3	3000/5	<i>Curve Type</i>	IEC - EI
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,1-25
		<i>Pickup Lowset</i>	0,83
		<i>Time Dial</i>	0,3
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,5-40
		<i>Pickup Highset</i>	4
		<i>Time Delay</i>	0,8
87	1200/5	<i>Curve Type</i>	IEC - EI
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,1-25
		<i>Pickup Lowset</i>	0,7
		<i>Time Dial</i>	0,5
		<i>Instantaneous</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,5-40
		<i>Pickup Highset</i>	8
		<i>Time Delay</i>	0,1
86	2000/5	<i>Curve Type</i>	IEC - EI
		<i>Overcurrent</i>	
		<i>Pickup Range × CT Sec,</i>	0,1-4
		<i>Pickup Lowset</i>	0,8

Tabel 4.9 Data Existing Rele Tipikal 3A dan 3B (lanjutan)

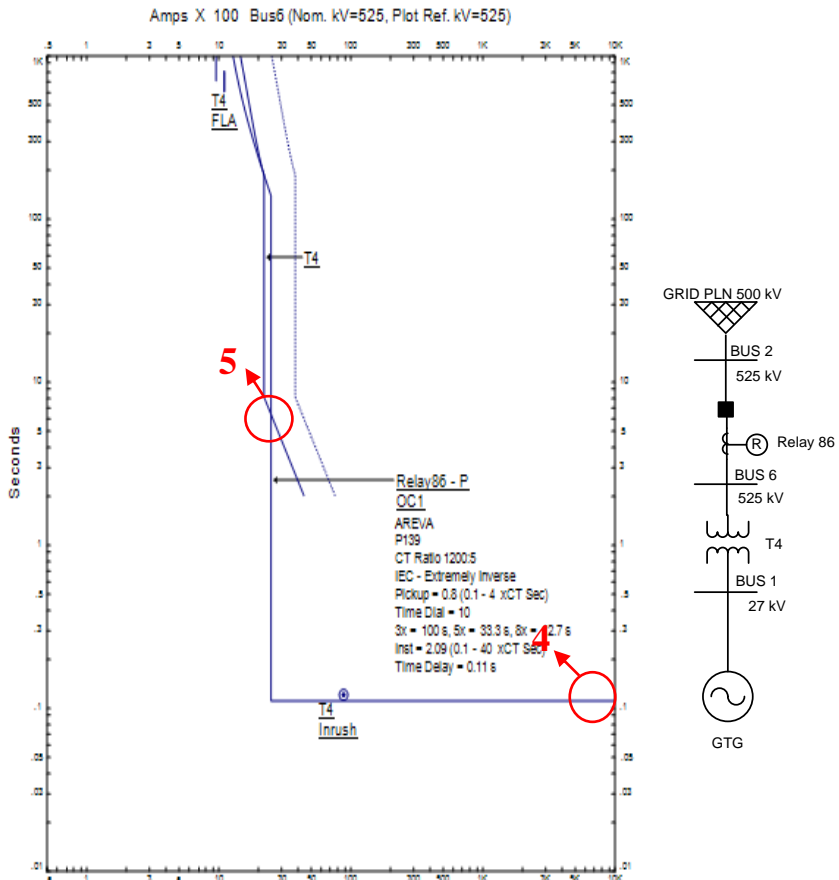
ID rele	CT Ratio	Setting	
		Time Dial	10
		Instantaneous	
		Pickup Range \times CT Sec,	0,1-40
		Pickup Highset	2,09
		Time Delay	0,11



Gambar 4. 26 (a) Tipikal 3A (b) Tipikal 3B



Gambar 4. 27 Plot Kurva Pengaman *Existing* Tipikal 3A



Gambar 4. 28 Plot Kurva Pengaman *Existing* Tipikal 3B

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 3A dan 3B, terlihat masih ada beberapa koordinasi yang kurang tepat, yaitu :

1. Pada lingkaran nomor 1, kurva *invers* rele 19 masih menyentuh kurva *starting* motor, sehingga starting motor terganggu sementara, namun tidak menghentikan kerja motor.
2. Pada lingkaran nomor 2, kurva *instantaneous* rele 19 tidak mempunyai *delay* hal ini tidak sesuai dengan standar IEEE 242.

3. Pada lingkaran nomor 3, *time delay* antar rele tidak sesuai standar yaitu bukan dalam *range* 0,2 – 0,4 detik.
4. Pada lingkaran nomor 4, *time delay* berada pada 0.13 detik, hal ini tidak sesuai dengan standar. Seharusnya rele ini bekerja dengan *time delay* 0,3 detik.
5. Pada lingkaran nomor 5, kurva *instantaneous* dari rele 86 menyentuh *damage curve* dari trafo T4.

Maka dari itu, perlu dilakukan *resetting* untuk memperbaiki koordinasi pengaman pada tipikal tersebut dengan cara melakukan perhitungan manual. Perhitungan parameter-parameter tipikal 3A dijabarkan sebagai berikut:

a. Rele 19

Manufaktur	: AREVA
Model	: MiCOM P139
Kurva	: IEC Extreamly Inverse
Rasio CT	: 600/5
Isc min Bus	: 12,87 kA
FLA Motor	: 423,7 A
LRC Motor	: 650 %
I Starting Motor	: 2754,05 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Motor} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Motor}$$

$$1,05 \times 423,7 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 423,7$$

$$444,885 < I_{\text{set}} < 593,18$$

$$\frac{444,885}{600} In < \text{Tap} < \frac{593,18}{600} In$$

$$0,741 < \text{Tap} < 0,989$$

Dipilih Tap 0,8 (*Range* 0,1 – 4 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 0,8 \times 600 = 480 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = waktu *starting* motor = 7 detik

$$t = \frac{80}{\left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]} \times k$$

$$t = \frac{80}{\left[\left(\frac{1,3 \times I_{\text{starting motor}}}{I_{\text{set}}} \right)^2 - 1 \right]} \times k$$

$$k = \frac{t \times \left[\left(\frac{1,3 \times I_{\text{starting motor}}}{I_{\text{set}}} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$k = \frac{7 \times \left[\left(\frac{1,3 \times 2754,05}{480} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$k = 4,78$$

Dipilih k atau *time dial* = 4,8

Instantaneous Pickup

$$LRC < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc min}}$$

$$2754,05 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 12870$$

$$2754,05 < I_{\text{set}} < 10296$$

$$\frac{2754,05}{600} In < \text{Tap} < \frac{10296}{600} In$$

$$4,59 < \text{Tap} < 17,16$$

Dipilih Tap 5,26 (*Range* 0,1 – 40 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 5,26 \times 600 = 3156 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

b. Rele 3

Manufaktur	: AREVA
Model	: MiCOM P121
Kurva	: IEC Extreamly Inverse
Rasio CT	: 3000/5
Isc Kontribusi PTHA - 011	: 14,86 kA
Isc min Bus SWGR – 3A	: 12,87 kA
FLA Sekunder Trafo	: 1506 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Sekunder Trafo} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Sekunder Trafo}$$

$$1,05 \times 1506 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 1506$$

$$1581,3 < I_{\text{set}} < 2108,4$$

$$\frac{1581,3}{3000} In < \text{Tap} < \frac{448,952}{3000} In$$

$$0,5271 < \text{Tap} < 0,7028$$

Dipilih Tap 0,56 (*Range* 0,1 – 25 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 0,56 \times 3000 = 1680 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,5 detik

$$t = \frac{80}{\left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]} \times k$$

$$k = \frac{t \times \left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$k = \frac{0,55 \times \left[\left(\frac{14860}{1680}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$k = 0,483$$

Dipilih k atau *time dial* = 0,5

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Sekunder Trafo} < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc min}}$$

$$1,6 \times 1506 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 12870$$

$$2409,6 < I_{\text{set}} < 10296$$

$$\frac{2409,6}{3000} In < \text{Tap} < \frac{10296}{3000} In$$

$$0,803 < \text{Tap} < 3,432$$

Dipilih Tap 1,98 (*Range* 0,5 – 40 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 1,98 \times 3000 = 5940 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,5 detik

c. Rele 87

Manufaktur

: AREVA

Model

: MiCOM P121

Kurva

: IEC Extreamly Inverse

Rasio CT

: 1200/5

Isc min bus 9

: 12601 kA (27 kV)

Isc kontribusi	: 14,86 kA (13,8 kV)
Konversi ke <i>high voltage</i>	: $\frac{13,8}{27} \times 14,86 = 7,59511$ kA
FLA Primer Trafo	: 769,8 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Primer Trafo} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Primer Trafo}$$

$$1,05 \times 769,8 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 769,8$$

$$808,29 < I_{\text{set}} < 1077,72$$

$$\frac{808,29}{1200} In < \text{Tap} < \frac{1077,72}{1200} In$$

$$0,674 < \text{Tap} < 0,898$$

Dipilih Tap 0,7 (*Range* 0,1 – 25 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 0,7 \times 1200 = 840 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,15 detik

$$t = \frac{80}{\left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]} \times k$$

$$k = \frac{t \times \left[\left(\frac{I}{I_{\text{set}}}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$k = \frac{0,15 \times \left[\left(\frac{7595,11}{840}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$k = 0,16$$

Dipilih k atau *time dial* = 0,725

Instantaneous Pickup

$$I_{\text{sc max bus SWGR}} - 3A \times \frac{kV \text{ sekunder}}{kV \text{ primer}} < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc min}}$$

$$39,79 \times \frac{13,8}{27} < I_{\text{set}} < 0,8 \times 12601000$$

$$20,33 < I_{\text{set}} < 10080800$$

$$\frac{20,33}{1200} In < \text{Tap} < \frac{10080800}{1200} In$$

$$0,017 < \text{Tap} < 8400,67$$

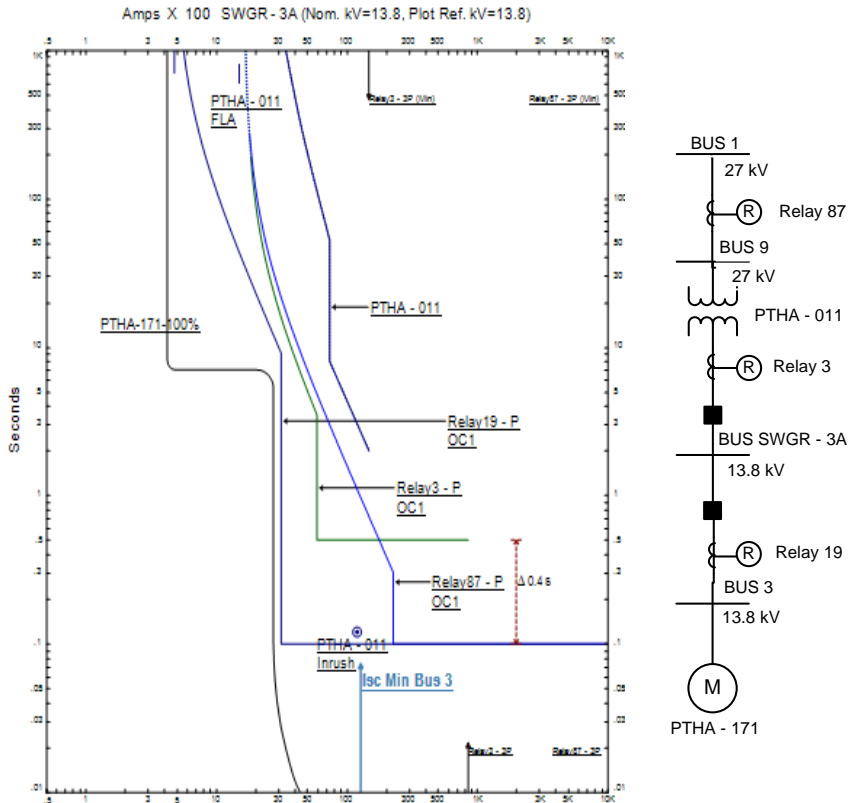
Dipilih Tap 9,71 (*Range* 0,5 – 40 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 9,71 \times 1200 = 11652 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik, karena memenuhi syarat nilai $I_{sc\ max}$ bus SWGR -3A lebih kecil dari pada $I_{sc\ min}$ bus 9.

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, didapatkan kurva pengaman tipikal 3A yang ditunjukkan pada Gambar 4.29 berikut:



Gambar 4. 29 Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 3A

Setelah melakukan plot kurva pengaman, dilakukan evaluasi koordinasi proteksi hasil *resetting*. Gambar 4.30 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat maksimum 0,5 cycle tiga fasa dan gangguan terletak

pada bus 3 (motor PTHA - 171), sedangkan Gambar 4.31 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat minimum 30 *cycle* dua fasa dan gangguan terletak pada bus 3 (motor PTHA - 171).

Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled

3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus3					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-02-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay19	49.828	100		Phase - OC1 - 50
170	CB17		70.0		Tripped by Relay19 Phase - OC1 - 50
300	Relay27	1.904	300		Phase - OC1 - 50
370	CB25		70.0		Tripped by Relay27 Phase - OC1 - 50
500	Relay3	14.86	500		Phase - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 50
718	Relay87	7.595	718		Phase - OC1 - 51
788	CB_02		70.0		Tripped by Relay87 Phase - OC1 - 51

Gambar 4. 30 *Sequence Viewer 0,5 Cycle* Tipikal 3A

Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled

Line-to-Line (Symmetrical) fault on bus: Bus3					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-02-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay19	12.869	100		Phase - OC1 - 50
170	CB17		70.0		Tripped by Relay19 Phase - OC1 - 50
500	Relay3	12.869	500		Phase - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 50
718	Relay87	7.595	718		Phase - OC1 - 51
788	CB_02		70.0		Tripped by Relay87 Phase - OC1 - 51

Gambar 4. 31 *Sequence Viewer 30 Cycle* Tipikal 3B

Sedangkan perhitungan parameter-parameter untuk Tipikal 3B sebagai berikut:

a. Rele 86

Manufaktur	: AREVA
Model	: MiCOM P139
Kurva	: IEC Normal Inverse
Rasio CT	: 1200/5
Isc Kontribusi Grid PLN	: 47,62 kA (525 kV)
Isc min	: 41,24 kA (525 kV)
Isc max Bus 1	: 14547 kA (27 kV)
Konversi ke <i>high voltage</i>	: $\frac{27}{525} \times 14547 = 748,131$ kA
FLA Primer Trafo	: 1109 A

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Primer Trafo} < I_{\text{set}} < 1,4 \times \text{FLA Primer Trafo}$$

$$1,05 \times 1109 < I_{\text{set}} < 1,4 \times 1109$$

$$1164,45 < I_{\text{set}} < 1552,6$$

$$\frac{1164,45}{1200} I_n < \text{Tap} < \frac{1552,6}{1200} I_n$$

$$0,970 < \text{Tap} < 1,294$$

Dipilih Tap 1,1 (*Range* 0,1 – 4 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 1,1 \times 1200 = 1320 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,35 detik

$$t = \frac{0,14}{\left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]} \times k$$

$$k = \frac{t \times \left[\left(\frac{1}{I_{\text{set}}} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$k = \frac{0,35 \times \left[\left(\frac{47620}{1320} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$k = 0,19$$

Dipilih k atau *time dial* = 0,19

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Primer Trafo} < I_{\text{set}} < 0,8 \times \text{Isc min}$$

$$1,6 \times 1109 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 41240$$

$$1774,4 < I_{\text{set}} < 32992$$

$$\frac{1774,4}{1200} In < \text{Tap} < \frac{32992}{1200} In$$

$$1,479 < \text{Tap} < 27,49$$

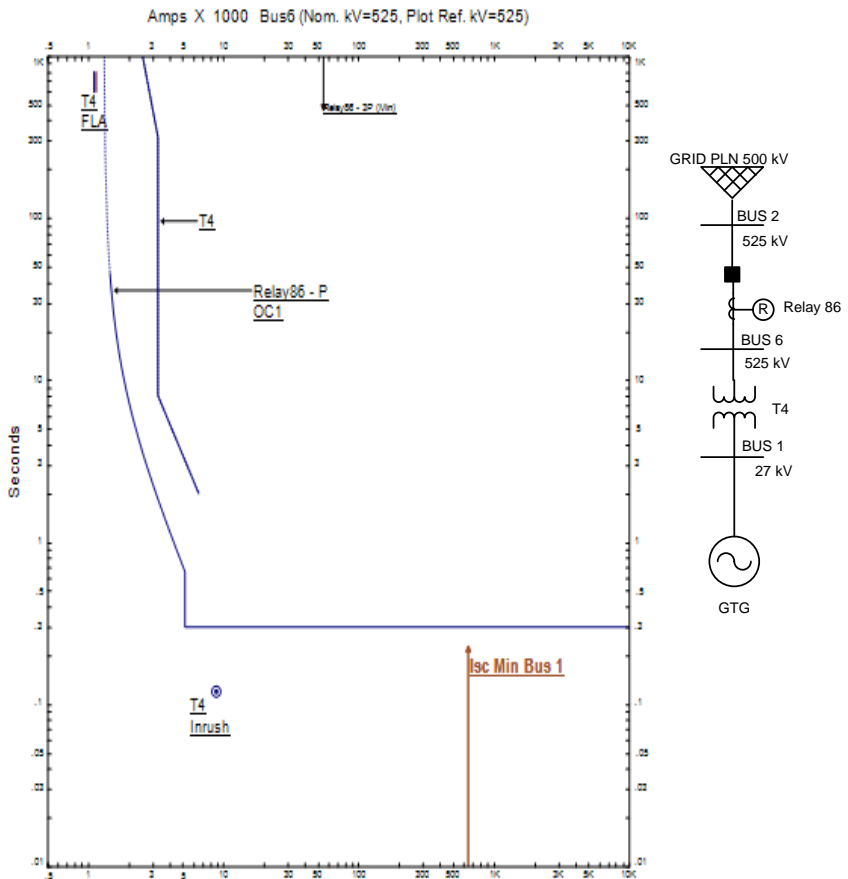
Dipilih Tap 4,34 (*Range* 0,1 – 40 dengan *step* 0,01)

$$I_{\text{set}} = 4,34 \times 1200 = 5208 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,3 detik

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, didapatkan kurva pengaman tipikal 3B yang ditunjukkan pada Gambar 4.32 berikut:



Gambar 4. 32 Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 3B

Setelah melakukan plot kurva pengaman, dilakukan evaluasi koordinasi proteksi hasil *resetting*. Gambar 4.33 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat maksimum 0,5 cycle tiga fasa dan gangguan terletak pada bus 1, sedangkan Gambar 4.34 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat minimum 30 cycle dua fasa dan gangguan terletak pada bus 1.

3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus1					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-01-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
300	Relay86	6.587	300		Phase - OC1 - 50
370	CB88		70.0		Tripped by Relay86 Phase - OC1 - 50
500	Relay3	10.675	500		Phase - OC1 - 50
500	Relay4	7.047	500		Phase - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 50
570	CB_03		70.0		Tripped by Relay4 Phase - OC1 - 50

Gambar 4. 33 *Sequence Viewer 0,5 Cycle Tipikal 3B*

Line-to-Line (Symmetrical) fault on bus: Bus1					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-01-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
300	Relay86	6.587	300		Phase - OC1 - 50
370	CB88		70.0		Tripped by Relay86 Phase - OC1 - 50

Gambar 4. 34 *Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 3B*

Dengan hasil perhitungan dan plot TCC di atas, maka data *resetting* tipikal 3A dan tipikal 3B dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 *Data Resetting Rele Tipikal 3A dan 3B*

ID Rele	Setting	Existing	Resetting
19	<i>Overcurrent</i>	IEC - LTI	IEC - EI
	<i>Pickup</i>	0,77	0,8
	<i>Time Dial</i>	0,01	4,8
	<i>Instantaneous</i>		
	<i>Pickup</i>	6	5,26
	<i>Time Delay</i>	-	0,1
3	<i>Overcurrent</i>	IEC - EI	IEC - EI
	<i>Pickup</i>	0,83	0,56
	<i>Time Dial</i>	0,3	0,5
	<i>Instantaneous</i>		
	<i>Pickup</i>	4	1,98
	<i>Time Delay</i>	0,8	0,5

Tabel 4.10 *Data Resetting Rele Tipikal 3A dan 3B (lanjutan)*

ID Rele	Setting	Existing	Resetting
87	<i>Overcurrent</i>	IEC - EI	IEC - EI
	<i>Pickup</i>	0,7	0,7
	<i>Time Dial</i>	0,5	0,725
	<i>Instantaneous</i>		
	<i>Pickup</i>	8	9,71
	<i>Time Delay</i>	0,1	0,1
86	<i>Overcurrent</i>	IEC - EI	IEC - EI
	<i>Pickup</i>	0,8	1,1
	<i>Time Dial</i>	10	0,19
	<i>Instantaneous</i>		
	<i>Pickup</i>	2,09	4,34
	<i>Time Delay</i>	0,11	0,3

Dari seluruh koordinasi tipikal 3A dan tipikal 3B ketika diberi gangguan pada bus 9, maka *sequence viewer* dapat dilihat pada Gambar 4.35 untuk 0,5 cycle dan Gambar 4.36 untuk 30 cycle.

3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus9					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-01-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay87	14543	100		Phase - OC1 - 50
170	CB_02		70.0		Tripped by Relay87 Phase - OC1 - 50
300	Relay86	6.587	300		Phase - OC1 - 50
370	CB88		70.0		Tripped by Relay86 Phase - OC1 - 50
500	Relay3	10.675	500		Phase - OC1 - 50
500	Relay4	7.047	500		Phase - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 50

Gambar 4.35 *Sequence Viewer 0,5 Cycle Tipikal 3*

Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled					
Line-to-Line (Symmetrical) fault on bus: Bus9					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 06-01-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay87	12600	100		Phase - OC1 - 50
170	CB_02		70.0		Tripped by Relay87 Phase - OC1 - 50
300	Relay86	6.587	300		Phase - OC1 - 50
370	CB88		70.0		Tripped by Relay86 Phase - OC1 - 50

Gambar 4.36 Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 3

Dari keseluruhan analisa gangguan yang terjadi pada tipikal 3 baik gangguan 0,5 cycle 3 fasa maupun 30 cycle 2 fasa dapat terlihat bahwa koordinasi dari seluruh tipikal 3 sudah benar, baik dari plot TCC hingga urutan sensing rele. Untuk mempermudah melihat urutan sensing rele pada keseluruhan tipikal 3 dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Urutan Sensing Tipikal 3

Letak Gangguan	Rele	0,5 Cycle		30 Cycle	
		Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele	Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele
Bus 3	19	100	50	100	50
	27	300	50	-	-
	3	500	50	500	50
	87	718	51	718	51
Bus 9	87	100	50	100	50
	86	300	50	300	50
	3	500	50	-	-
	4	500	50	-	-
Bus 1	86	300	50	300	50
	3	500	50	-	-
	4	500	50	-	-

4.5 Studi Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Ke Tanah

Koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah perlu dilakukan untuk mengatasi ketika mengalami hubung singkat ke tanah baik itu satu fasa maupun dua fasa. Dalam melakukannya *setting* rele gangguan ke tanah ini berhubungan dengan nilai NGR (*Neutral Grounding Resistor*) pada suatu peralatan, biasanya terdapat pada trafo dan generator. Jika pentanahan suatu peralatan menggunakan *low resistant grounding* biasanya gangguan cukup mudah atau sensitive untuk dideteksi, arus gangguan dapat dibatasi untuk tidak merusak peralatan, pertimbangan *arc-flash*, *setting* arus 10-40%, digunakan rele *instantaneous* (rele 50), dan waktu *digrading*.

Dalam koordinasinya, berbeda pada setiap level tegangan dan mempertimbangkan bentuk pentanahannya. Ketika pentanahannya bertemu dengan segitiga atau delta (Δ) maka *grading* akan reset 0,1 detik.

4.5.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Ke Tanah Tipikal 1

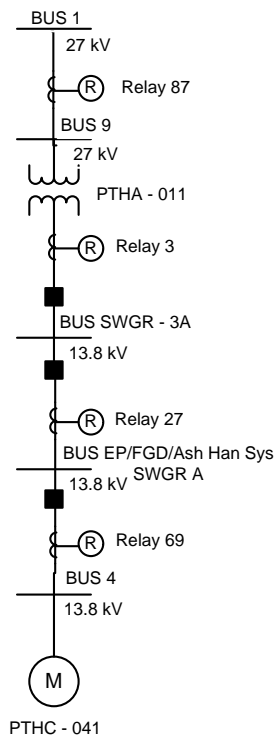
Koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 1 adalah koordinasi rele dari beban PTHC – 041 hingga STG, tipikal 1 gangguan ke tanah ini tidak sampai T4 karena trafo tersebut terhubung *wye solid-delta*. Pada tipikal 1 terdapat rele 69, rele 27, rele 3, dan rele. Koordinasi tipikal 1 ditunjukkan pada Gambar 4.37 dan kondisi *existing* pada koordinasi tipikal 1 ditunjukkan Gambar 4.38. *Setting* dari rele pada kondisi *existing* dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Data *Existing* Rele *Ground* Tipikal 1

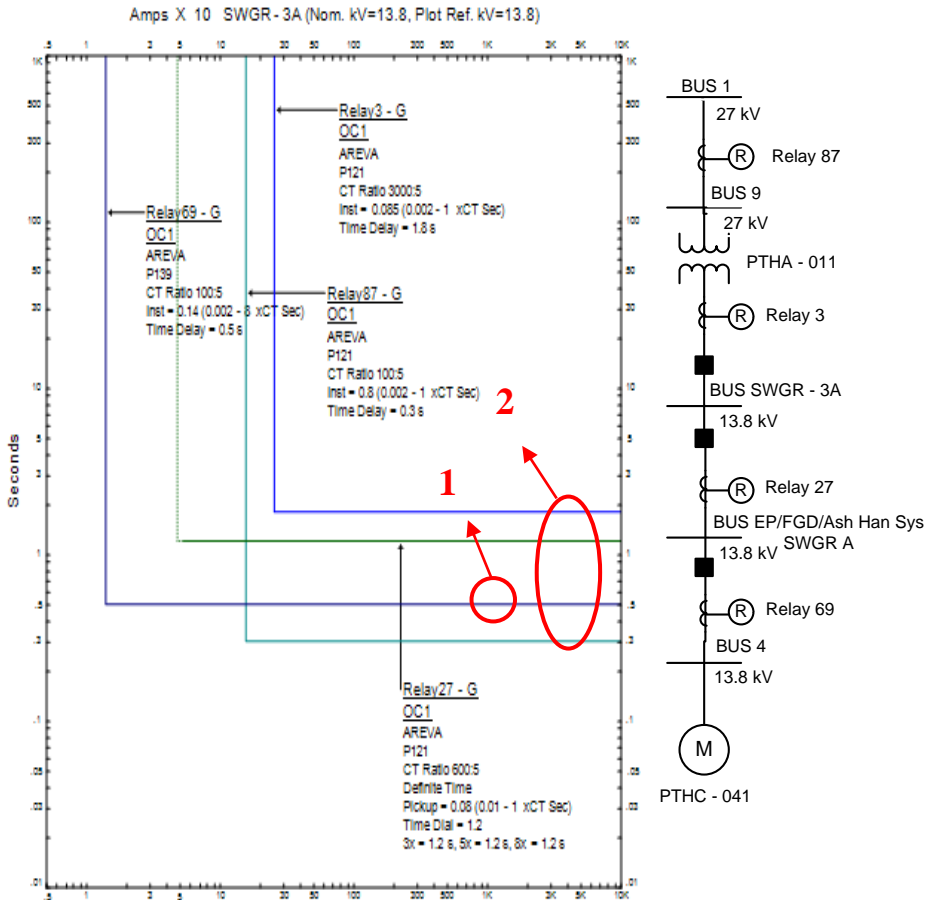
ID Rele	CT Ratio	Setting			
		Definite Time		Instantaneous	
69	100/5	Pick Up	-	Pick Up	0,14
		Time Dial	-	Time Delay	0,5
27	600/5	Pick Up	0,08	Pick Up	-
		Time Dial	1,2	Time Delay	-
3	3000/5	Pick Up	-	Pick Up	0,085
		Time Dial	-	Time Delay	1,8

Tabel 4. 12 Data Existing Rele Ground Tipikal 1 (lanjutan)

ID Rele	CT Ratio	Setting			
		Definite Time		Instantaneous	
87	100/5	Pick Up	-	Pick Up	0,8
		Time Dial	-	Time Delay	0,3



Gambar 4. 37 Tipikal 1 Rele *Ground Fault*



Gambar 4. 38 Plot Kurva Pengaman Kondisi *Existing* Tipikal 1

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 1, terlihat masih ada beberapa koordinasi yang kurang tepat, yaitu :

1. Pada lingkaran nomor 1, kurva *ground* rele 69 terlihat bekerja ketika 5 detik, sedangkan seharusnya untuk mengamankan motor, cukup 0,1 detik untuk membuat trip ketika *ground fault* terjadi .

2. Pada lingkaran nomor 2, kurva *ground* rele 27, rele 3, dan rele 87 tidak bekerja sesuai *gradding time* yang benar. Hal ini tidak sesuai dengan standar IEEE 242.

koordinasi pengaman pada tipikal tersebut dengan cara melakukan perhitungan manual. Perhitungan parameter-parameter tipikal 1 dijabarkan sebagai berikut:

a. Rele 69

Manufaktur	: AREVA
Model	: P-139
Kurva	: Instantaneous
Rasio CT	: 100/5
NGR	: 1000 A

Instantaneous Pickup

$$I_{SC} \text{ Unbalance} < I_{set} < 50\% \times I_{sc} \text{ LG}$$

$$5\%-10\% \times \text{NGR} < I_{set} < 50\% \times \text{NGR}$$

$$5\% \times 1000 \text{ A} < I_{set} < 50\% \times 1000 \text{ A}$$

$$50 \text{ A} < I_{set} < 500 \text{ A}$$

$$\frac{50}{100} In < \text{Tap} < \frac{500}{100} In$$

$$0,5 In < \text{Tap} < 5 In$$

Dipilih Tap 0,5 (*Range* 0,002 – 8 dengan *step* 0,1)

$$I_{set} = 0,5 \times 100 = 50 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

b. Rele 27

Manufaktur	: AREVA
Model	: P-121
Kurva	: Definit Time
Rasio CT	: 600/5
NGR	: 1000 A

Instantaneous Pickup

$$I_{SC} \text{ Unbalance} < I_{set} < 50\% \times I_{sc} \text{ LG}$$

$$5\%-10\% \times \text{NGR} < I_{set} < 50\% \times \text{NGR}$$

$$5\% \times 1000 \text{ A} < I_{\text{set}} < 50\% \times 1000 \text{ A}$$

$$50 \text{ A} < I_{\text{set}} < 500 \text{ A}$$

$$\frac{50}{600} In < \text{Tap} < \frac{500}{600} In$$

$$0,08 In < \text{Tap} < 0,83 In$$

Dipilih Tap 0,08 (*Range* 0,01 – 1 dengan *step* 0,005)

$$I_{\text{set}} = 0,08 \times 600 = 50 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,3 detik

c. Rele 3

Manufaktur : AREVA

Model : P-121

Kurva : Instantaneous

Rasio CT : 3000/5

NGR : 1000 A

Instantaneous Pickup

$$I_{\text{SC Unbalance}} < I_{\text{set}} < 50\% \times I_{\text{sc LG}}$$

$$5\%-10\% \times \text{NGR} < I_{\text{set}} < 50\% \times \text{NGR}$$

$$5\% \times 1000 \text{ A} < I_{\text{set}} < 50\% \times 1000 \text{ A}$$

$$50 \text{ A} < I_{\text{set}} < 500 \text{ A}$$

$$\frac{50}{3000} In < \text{Tap} < \frac{500}{3000} In$$

$$0,017 In < \text{Tap} < 0,17 In$$

Dipilih Tap 0,017 (*Range* 0,002 – 1 dengan *step* 0,1)

$$I_{\text{set}} = 0,017 \times 3000 = 50 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,5 detik

d. Rele 87

Manufaktur : AREVA

Model : P-121

Kurva : Instantaneous

Rasio CT : 100/5

NGR : 1575 A

Instantaneous Pickup

$$\begin{aligned} I_{SC} \text{ Unbalance} &< I_{set} < 50\% \times I_{sc} \text{ LG} \\ 5\% - 10\% \times \text{NGR} &< I_{set} < 50\% \times \text{NGR} \\ 5\% \times 1575 \text{ A} &< I_{set} < 50\% \times 1575 \text{ A} \\ 78,75 \text{ A} &< I_{set} < 787,5 \text{ A} \\ \frac{78,75}{100} In &< \text{Tap} < \frac{787,5}{100} In \\ 0,7875 In &< \text{Tap} < 7,875 In \end{aligned}$$

Dipilih Tap 0,7875 (*Range* 0,002 – 1 dengan *step* 0,1)

$$I_{set} = 0,7875 \times 100 = 78,75 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik, karena grounding trafo pada sisi primer delta, sehingga *gradding time* rele *ground* reset menjadi 0,1 detik,

e. Rele 1

Manufaktur	: Beckwith Electric
Model	: P-121
Kurva	: Instantaneous
Rasio CT	: 100/5
NGR	: 1575 A

Instantaneous Pickup

$$\begin{aligned} I_{SC} \text{ Unbalance} &< I_{set} < 50\% \times I_{sc} \text{ LG} \\ 5\% - 10\% \times \text{NGR} &< I_{set} < 50\% \times \text{NGR} \\ 5\% \times 1575 \text{ A} &< I_{set} < 50\% \times 1575 \text{ A} \\ 78,75 \text{ A} &< I_{set} < 787,5 \text{ A} \\ \frac{78,75}{n_{CT}} &< \text{Tap} < \frac{787,5}{n_{CT}} \\ \frac{78,75}{(\frac{100}{5})} &< \text{Tap} < \frac{787,5}{(\frac{100}{5})} \end{aligned}$$

$$3,9375 < \text{Tap} < 39,375$$

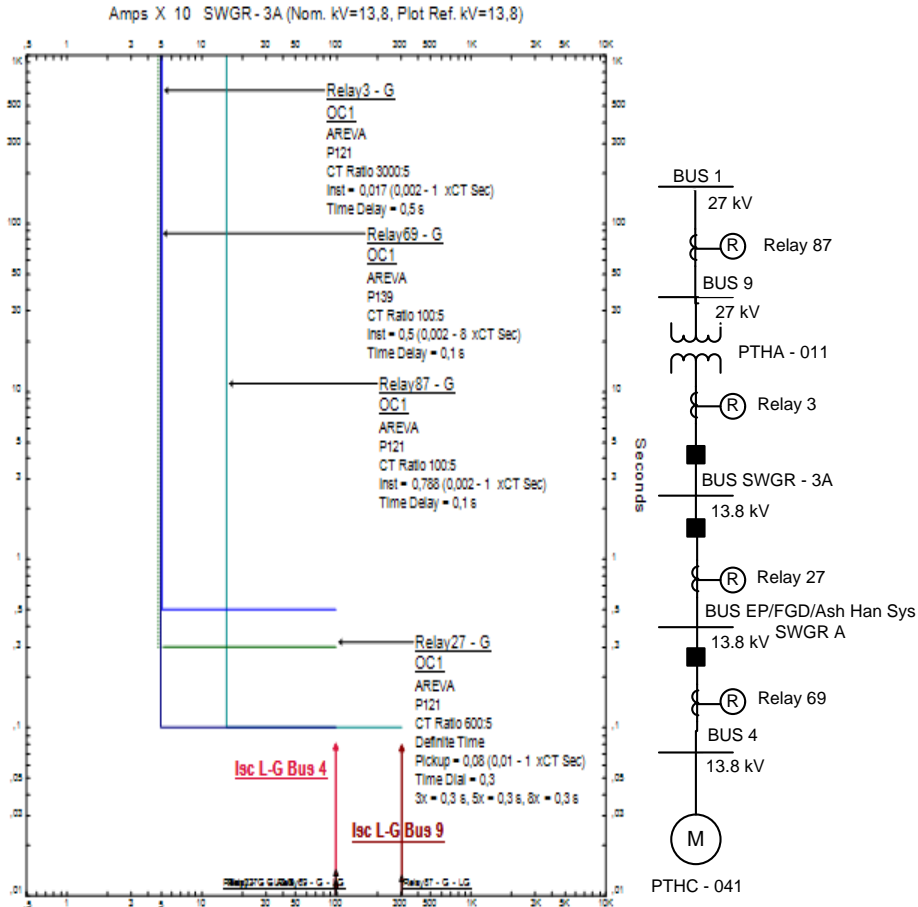
Dipilih Tap 3,9375 (*Range* 0,1 – 240 dengan *step* 0,1)

$$I_{set} = 3,9375 \times (100/5) = 78,75 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,3 detik

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, didapatkan kurva pengaman tipikal 1 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.39 berikut:



Gambar 4. 39 Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 1

Setelah melakukan plot kurva pengaman, dilakukan evaluasi koordinasi proteksi hasil *resetting*. Gambar 4.40 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat maksimum 0,5 cycle tiga fasa dan gangguan terletak

pada bus 4, sedangkan Gambar 4.41 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat minimum 30 cycle dua fasa dan gangguan terletak pada bus 4.

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay69	0.998	100		Ground - OC1 - 50
100	Relay69	0.99	100		Phase - OC1 - 50
170	CB67		70.0		Tripped by Relay69 Ground - OC1 - 50
170	CB67		70.0		Tripped by Relay69 Phase - OC1 - 50
300	Relay27	0.998	300		Ground - OC1 - 51
370	CB25		70.0		Tripped by Relay27 Ground - OC1 - 51
500	Relay3	0.998	500		Ground - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Ground - OC1 - 50

Gambar 4. 40 *Sequence Viewer 0,5 Cycle* Tipikal 1

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay69	0.995	100		Ground - OC1 - 50
100	Relay69	0.995	100		Phase - OC1 - 50
170	CB67		70.0		Tripped by Relay69 Ground - OC1 - 50
170	CB67		70.0		Tripped by Relay69 Phase - OC1 - 50
300	Relay27	0.995	300		Ground - OC1 - 51
370	CB25		70.0		Tripped by Relay27 Ground - OC1 - 51
500	Relay3	0.995	500		Ground - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Ground - OC1 - 50
10220	Relay27	0.995	10220		Phase - OC1 - 51

Gambar 4. 41 *Sequence Viewer 30 Cycle* Tipikal 1

Dengan hasil perhitungan dan plot TCC di atas, maka data *resetting* tipikal 1 dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Data *Resetting* Rele *Ground* Tipikal 1

ID Rele	Setting Existing				Setting Resetting			
	Definite Time		Instantaneous		Definite Time		Instantaneous	
69	I>	-	I>>	0,14	I>	-	I>>	0,5
	t>	-	t>>	0,5	t>	-	t>>	0,1
27	I>	0,08	I>>	-	I>	0,08	I>>	-
	t>	1,2	t>>	-	t>	0,3	t>>	-
3	I>	-	I>>	0,085	I>	-	I>>	0,017
	t>	-	t>>	1,8	t>	-	t>>	0,5
87	I>	-	I>>	0,8	I>	-	I>>	0,787
	t>	-	t>>	0,3	t>	-	t>>	0,1

Dari keseluruhan analisa gangguan yang terjadi pada tipikal 1 baik gangguan *0,5 cycle line to ground* maupun *30 cycle line to ground* dapat terlihat bahwa koordinasi dari seluruh tipikal 1 sudah benar, baik dari plot TCC hingga urutan sensing rele. Untuk mempermudah melihat urutan sensing rele pada keseluruhan tipikal 1 dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Urutan Sensing Tipikal 1 *Ground Fault*

Letak Gangguan	Rele	0,5 Cycle		30 Cycle	
		Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele	Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele
Bus 4	69	100	50	100	50
	27	300	50	300	50
	3	500	50	500	50
Bus 9	87	100	50	100	50

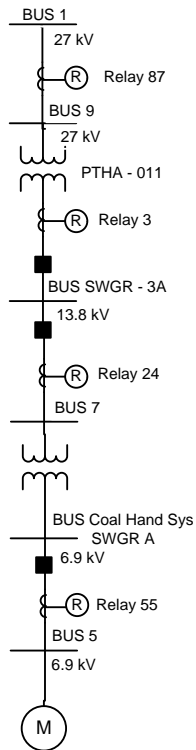
4.5.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Ke Tanah Tipikal 2

Koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 2 adalah koordinasi rele dari beban PTHD – 041 hingga STG, tipikal 2 gangguan ke tanah ini tidak sampai T4 karena trafo tersebut terhubung *wye solid-delta*. Pada tipikal 2 terdapat rele 55, rele 24, rele 3, dan rele 87. Koordinasi tipikal 2 ditunjukkan pada Gambar 4.42 dan kondisi *existing*

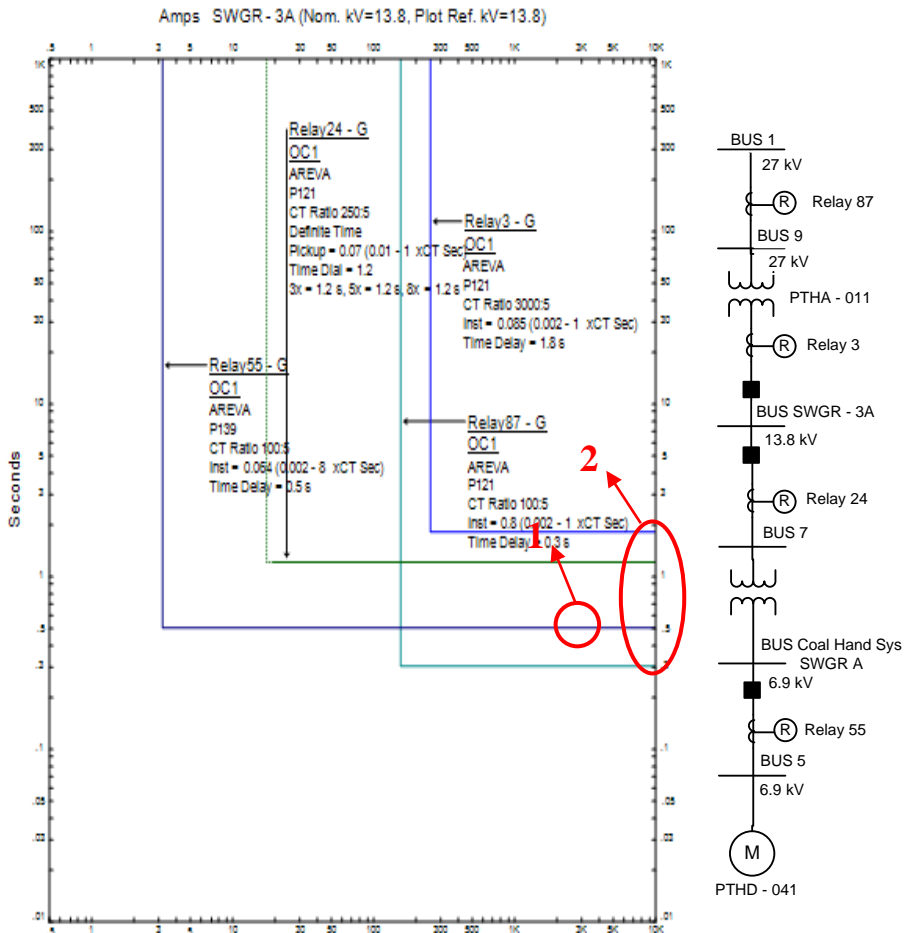
pada koordinasi tipikal 2 ditunjukkan Gambar 4.43. *Setting* dari rele pada kondisi *existing* dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4. 15 Data *Existing* Rele *Ground* Tipikal 2

ID Rele	CT Ratio	Setting			
		Definite Time		Instantaneous	
55	100/5	Pick Up	-	Pick Up	0,064
		Time Dial	-	Time Delay	0,5
24	250/5	Pick Up	0,07	Pick Up	-
		Time Dial	1,2	Time Delay	-
3	3000/5	Pick Up	-	Pick Up	0,085
		Time Dial	-	Time Delay	1,8
87	100/5	Pick Up	-	Pick Up	0,8
		Time Dial	-	Time Delay	0,3



Gambar 4. 42 Tipikal 2 Rele ^{PTHD - 044} *Ground Fault*



Gambar 4. 43 Plot Kurva Pengaman Kondisi *Existing* Tipikal 2

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 2, terlihat masih ada beberapa koordinasi yang kurang tepat, yaitu :

1. Pada lingkaran nomor 1, kurva *ground* rele 55 terlihat bekerja ketika 5 detik, sedangkan seharusnya untuk mengamankan motor, cukup 0,1 detik untuk membuat trip ketika *groun fault* terjadi .

2. Pada lingkaran nomor 2, kurva *ground* rele 24, rele 3, dan rele 87 tidak bekerja sesuai *gradding time* yang benar. Hal ini tidak sesuai dengan standar IEEE 242.

Maka dari itu, perlu dilakukan *resetting* untuk memperbaiki koordinasi pengaman pada tipikal tersebut dengan cara melakukan perhitungan manual. Perhitungan parameter-parameter tipikal 2 dijabarkan sebagai berikut:

a. Rele 55

Manufaktur	: AREVA
Model	: P-139
Kurva	: Instantaneous
Rasio CT	: 100/5
NGR	: 400 A

Instantaneous Pickup

$$I_{SC} \text{ Unbalance} < I_{set} < 50\% \times I_{sc} \text{ LG}$$

$$5\% - 10\% \times \text{NGR} < I_{set} < 50\% \times \text{NGR}$$

$$5\% \times 400 \text{ A} < I_{set} < 50\% \times 400 \text{ A}$$

$$20 \text{ A} < I_{set} < 200 \text{ A}$$

$$\frac{20}{100} In < \text{Tap} < \frac{200}{100} In$$

$$0,2 In < \text{Tap} < 2 In$$

Dipilih Tap 0,2 (*Range* 0,002 – 8 dengan *step* 0,1)

$$I_{set} = 0,2 \times 100 = 20 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

b. Rele 24

Manufaktur	: AREVA
Model	: P-121
Kurva	: Definite Time
Rasio CT	: 250/5
NGR	: 1000 A

Instantaneous Pickup

$$\begin{aligned} I_{SC} \text{ Unbalance} &< I_{set} < 50\% \times I_{sc} \text{ LG} \\ 5\% - 10\% \times \text{NGR} &< I_{set} < 50\% \times \text{NGR} \\ 5\% \times 1000 \text{ A} &< I_{set} < 50\% \times 1000 \text{ A} \\ 50 \text{ A} &< I_{set} < 500 \text{ A} \\ \frac{50}{250} In &< \text{Tap} < \frac{500}{250} In \\ 0,2 In &< \text{Tap} < 2 In \end{aligned}$$

Dipilih Tap 0,2 (*Range* 0,01 – 1 dengan *step* 0,005)

$$I_{set} = 0,2 \times 250 = 50 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik, karena grounding trafo pada sisi primer delta, sehingga *gradding time* rele *ground* reset menjadi 0,1 detik,

c. Rele 3

Manufaktur	: AREVA
Model	: P-121
Kurva	: Instantaneous
Rasio CT	: 3000/5
NGR	: 1000 A

Instantaneous Pickup

$$\begin{aligned} I_{SC} \text{ Unbalance} &< I_{set} < 50\% \times I_{sc} \text{ LG} \\ 5\% - 10\% \times \text{NGR} &< I_{set} < 50\% \times \text{NGR} \\ 5\% \times 1000 \text{ A} &< I_{set} < 50\% \times 1000 \text{ A} \\ 50 \text{ A} &< I_{set} < 500 \text{ A} \\ \frac{50}{3000} In &< \text{Tap} < \frac{500}{3000} In \\ 0,017 In &< \text{Tap} < 0,17 In \end{aligned}$$

Dipilih Tap 0,017 (*Range* 0,002 – 1 dengan *step* 0,1)

$$I_{set} = 0,017 \times 3000 = 50 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,5 detik

d. Rele 87

Manufaktur	: AREVA
Model	: P-121
Kurva	: Instantaneous
Rasio CT	: 100/5
NGR	: 1575 A

Instantaneous Pickup

$$I_{SC} \text{ Unbalance} < I_{set} < 50\% \times I_{sc} \text{ LG}$$

$$5\% - 10\% \times \text{NGR} < I_{set} < 50\% \times \text{NGR}$$

$$5\% \times 1575 \text{ A} < I_{set} < 50\% \times 1575 \text{ A}$$

$$78,75 \text{ A} < I_{set} < 787,5 \text{ A}$$

$$\frac{78,75}{100} In < \text{Tap} < \frac{787,5}{100} In$$

$$0,7875 In < \text{Tap} < 7,875 In$$

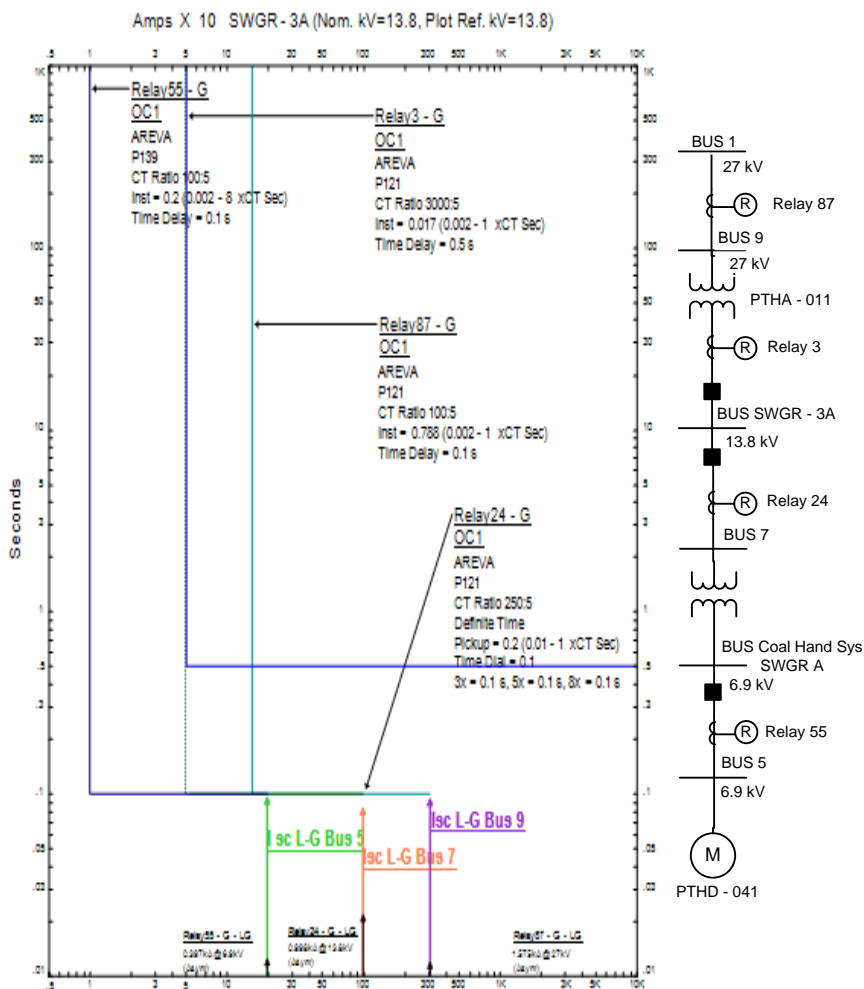
Dipilih Tap 0,7875 (*Range* 0,002 – 1 dengan *step* 0,1)

$$I_{set} = 0,7875 \times 100 = 78,75 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik, karena grounding trafo pada sisi primer delta, sehingga *gradding time* rele *ground* reset menjadi 0,1 detik.

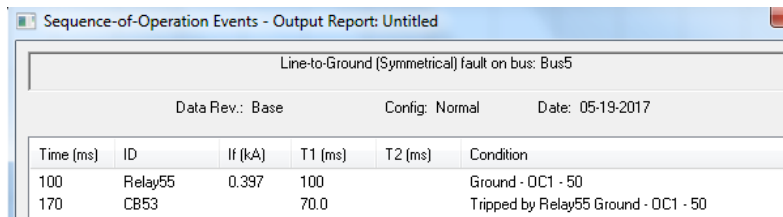
Berdasarkan hasil perhitungan di atas, didapatkan kurva pengaman tipikal 2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.44:



Gambar 4. 44 Plot Kurva Pengaman *Resetting* Tipikal 2

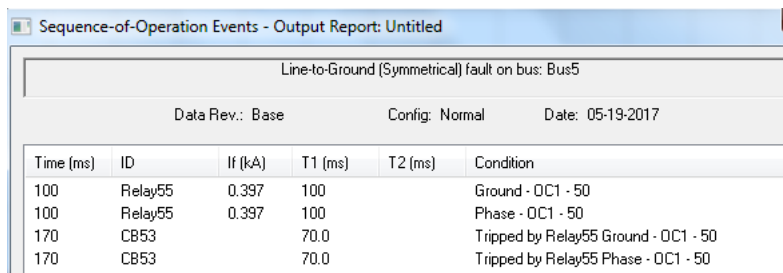
Setelah melakukan plot kurva pengaman, dilakukan evaluasi koordinasi proteksi hasil *resetting*. Gambar 4.45 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat maksimum 0,5 cycle tiga fasa dan gangguan terletak pada bus 5, sedangkan Gambar 4.46 menunjukkan *Sequence Of*

Operation Event (Sequence Viewer) atau waktu kerja pada saat hubung singkat minimum 30 cycle dua fasa dan gangguan terletak pada bus 5. Melakukan evaluasi lagi dengan memberi gangguan satu fasa ke tanah pada bus 7, untuk keadaan 0,5 cycle dan 30 cycle, untuk gambar dapat dilihat pada Gambar 4.47 dan Gambar 4.48.



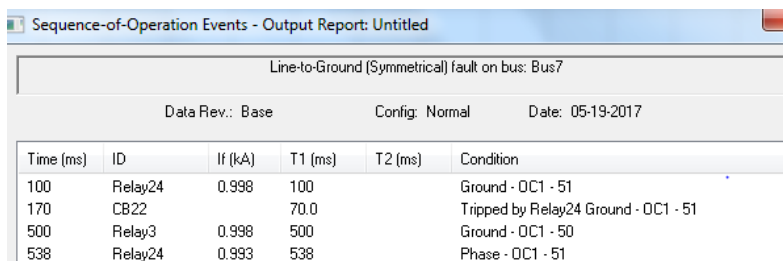
Line-to-Ground (Symmetrical) fault on bus: Bus5					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 05-19-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay55	0.397	100		Ground - OC1 - 50
170	CB53		70.0		Tripped by Relay55 Ground - OC1 - 50

Gambar 4. 45 *Sequence Viewer 0,5 Cycle Tipikal 2 Case 1*



Line-to-Ground (Symmetrical) fault on bus: Bus5					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 05-19-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay55	0.397	100		Ground - OC1 - 50
100	Relay55	0.397	100		Phase - OC1 - 50
170	CB53		70.0		Tripped by Relay55 Ground - OC1 - 50
170	CB53		70.0		Tripped by Relay55 Phase - OC1 - 50

Gambar 4. 46 *Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 2 Case 1*



Line-to-Ground (Symmetrical) fault on bus: Bus7					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 05-19-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay24	0.998	100		Ground - OC1 - 51
170	CB22		70.0		Tripped by Relay24 Ground - OC1 - 51
500	Relay3	0.998	500		Ground - OC1 - 50
538	Relay24	0.993	538		Phase - OC1 - 51

Gambar 4. 47 *Sequence Viewer 0,5 Cycle Tipikal 2 Case 2*

Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled					
Line-to-Ground (Symmetrical) fault on bus: Bus7					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 05-19-2017	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay24	0.995	100		Ground - OC1 - 51
170	CB22		70.0		Tripped by Relay24 Ground - OC1 - 51
500	Relay3	0.995	500		Ground - OC1 - 50
537	Relay24	0.995	537		Phase - OC1 - 51
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Ground - OC1 - 50
607	CB22		70.0		Tripped by Relay24 Phase - OC1 - 51

Gambar 4. 48 *Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 2 Case 2*

Dengan hasil perhitungan dan plot TCC di atas, maka data *resetting* tipikal 2 dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4. 16 *Data Resetting Rele Ground Tipikal 2*

ID Rele	Setting Existing				Setting Resetting			
	Definite Time		Instantaneous		Definite Time		Instantaneous	
55	I>	-	I>>	0,064	I>	-	I>>	0,2
	t>	-	t>>	0,5	t>	-	t>>	0,1
24	I>	0,07	I>>	-	I>	0,2	I>>	-
	t>	1,2	t>>	-	t>	0,1	t>>	-
3	I>	-	I>>	0,085	I>	-	I>>	0,017
	t>	-	t>>	1,8	t>	-	t>>	0,5
87	I>	-	I>>	0,8	I>	-	I>>	0,787 5
	t>	-	t>>	0,3	t>	-	t>>	0,1

Dari keseluruhan analisa gangguan yang terjadi pada tipikal 2 baik gangguan 0,5 cycle line to ground maupun 30 cycle line to ground dapat terlihat bahwa koordinasi dari seluruh tipikal 2 sudah benar, baik dari plot TCC hingga urutan sensing rele. Untuk mempermudah melihat urutan sensing rele pada keseluruhan tipikal 2 dapat dilihat pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17 Urutan Sensing Tipikal 2 *Ground Fault*

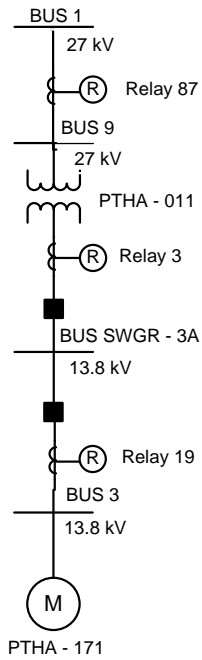
Letak Gangguan	Rele	0,5 Cycle		30 Cycle	
		Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele	Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele
Bus 5	55	100	50	100	50
Bus 7	24	100	50	100	50
	3	300	50	300	50
Bus 9	87	100	50	100	50

4.5.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Gangguan Ke Tanah Tipikal 3

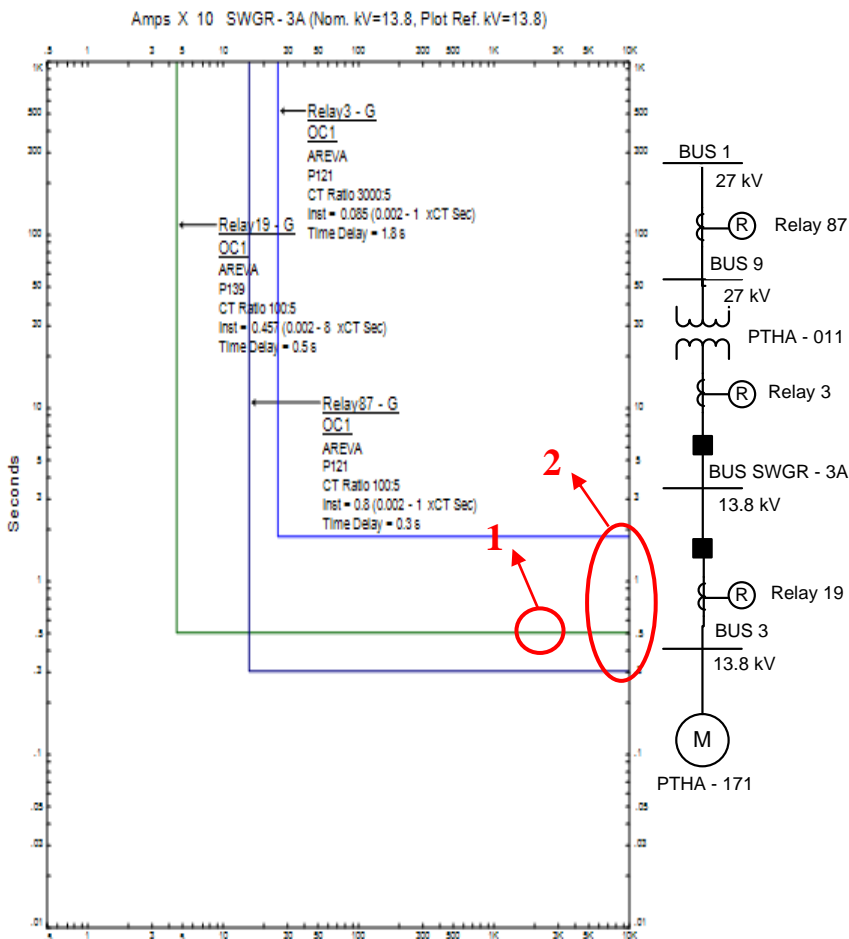
Koordinasi rele arus lebih gangguan ke tanah tipikal 3 adalah koordinasi rele dari beban PTHA – 171 hingga STG, tipikal 2 gangguan ke tanah ini tidak sampai T4 karena trafo tersebut terhubung *wye solid-delta*. Pada tipikal 3 terdapat rele 19, rele 3, dan rele 87. Koordinasi tipikal 3 ditunjukkan pada Gambar 4.49 dan kondisi *existing* pada koordinasi tipikal 3 ditunjukkan Gambar 4.50. *Setting* dari rele pada kondisi *existing* dapat dilihat pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Data *Existing* Rele *Ground* Tipikal 3

ID Rele	CT Ratio	Setting			
		Definite Time		Instantaneous	
19	100/5	Pick Up	-	Pick Up	0,457
		Time Dial	-	Time Delay	0,5
3	3000/5	Pick Up	-	Pick Up	0,085
		Time Dial	-	Time Delay	1,8
87	100/5	Pick Up	-	Pick Up	0,8
		Time Dial	-	Time Delay	0,3



Gambar 4. 49 Tipikal 3 Rele *Ground Fault*



Gambar 4. 50 Plot Kurva Pengaman Kondisi *Existing* Tipikal 3

Dari hasil plot kurva pengaman *existing* tipikal 3, terlihat masih ada beberapa koordinasi yang kurang tepat, yaitu :

1. Pada lingkaran nomor 1, kurva *ground* rele 19 terlihat bekerja ketika 5 detik, sedangkan seharusnya untuk mengamankan motor, cukup 0,1 detik untuk membuat trip ketika *groun fault* terjadi .

2. Pada lingkaran nomor 2, kurva *ground* rele 3 dan rele 87 tidak bekerja sesuai *gradding time* yang benar. Hal ini tidak sesuai dengan standar IEEE 242.

koordinasi pengaman pada tipikal tersebut dengan cara melakukan perhitungan manual. Perhitungan parameter-parameter tipikal 3 dijabarkan sebagai berikut:

a. Rele 19

Manufaktur	: AREVA
Model	: P-139
Kurva	: Instantaneous
Rasio CT	: 100/5
NGR	: 1000 A

Instantaneous Pickup

$$I_{SC} \text{ Unbalance} < I_{set} < 50\% \times I_{sc} \text{ LG}$$

$$5\% - 10\% \times NGR < I_{set} < 50\% \times NGR$$

$$5\% \times 1000 \text{ A} < I_{set} < 50\% \times 1000 \text{ A}$$

$$50 \text{ A} < I_{set} < 500 \text{ A}$$

$$\frac{50}{100} In < \text{Tap} < \frac{500}{100} In$$

$$0,5 In < \text{Tap} < 5 In$$

Dipilih Tap 0,5 (*Range* 0,002 – 8 dengan *step* 0,1)

$$I_{set} = 0,5 \times 100 = 50 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik

b. Rele 3

Manufaktur	: AREVA
Model	: P-121
Kurva	: Instantaneous
Rasio CT	: 3000/5
NGR	: 1000 A

Instantaneous Pickup

$$I_{SC} \text{ Unbalance} < I_{set} < 50\% \times I_{sc} \text{ LG}$$

$$5\% - 10\% \times \text{NGR} < I_{set} < 50\% \times \text{NGR}$$

$$5\% \times 1000 \text{ A} < I_{set} < 50\% \times 1000 \text{ A}$$

$$50 \text{ A} < I_{set} < 500 \text{ A}$$

$$\frac{50}{3000} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{500}{3000} \text{ In}$$

$$0,017 \text{ In} < \text{Tap} < 0,17 \text{ In}$$

Dipilih Tap 0,017 (*Range* 0,002 – 1 dengan *step* 0,1)

$$I_{set} = 0,017 \times 3000 = 50 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,5 detik

c. Rele 87

Manufaktur : AREVA

Model : P-121

Kurva : Instantaneous

Rasio CT : 100/5

NGR : 1575 A

Instantaneous Pickup

$$I_{SC} \text{ Unbalance} < I_{set} < 50\% \times I_{sc} \text{ LG}$$

$$5\% - 10\% \times \text{NGR} < I_{set} < 50\% \times \text{NGR}$$

$$5\% \times 1575 \text{ A} < I_{set} < 50\% \times 1575 \text{ A}$$

$$78,75 \text{ A} < I_{set} < 787,5 \text{ A}$$

$$\frac{78,75}{100} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{787,5}{100} \text{ In}$$

$$0,7875 \text{ In} < \text{Tap} < 7,875 \text{ In}$$

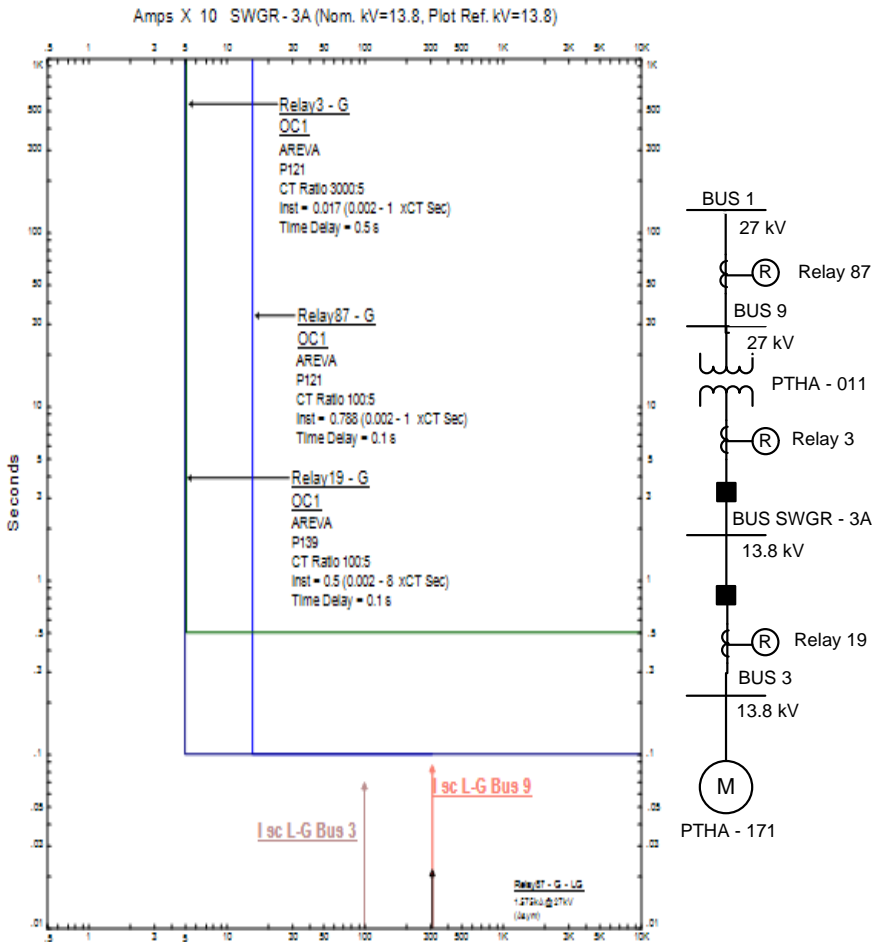
Dipilih Tap 0,7875 (*Range* 0,002 – 1 dengan *step* 0,1)

$$I_{set} = 0,7875 \times 100 = 78,75 \text{ A}$$

Time Delay

Dipilih *Time Delay* 0,1 detik, karena grounding trafo pada sisi primer delta, sehingga *gradding time* rele *ground* reset menjadi 0,1 detik.

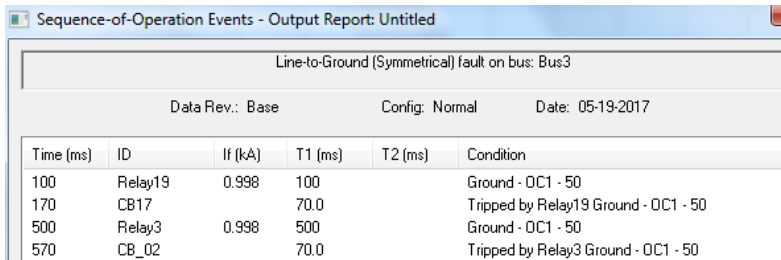
Berdasarkan hasil perhitungan di atas, didapatkan kurva pengaman tipikal 3 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.51 berikut:



Gambar 4.51 Plot Kurva Pengaman Resetting Tipikal 3

Setelah melakukan plot kurva pengaman, dilakukan evaluasi koordinasi proteksi hasil *resetting*. Gambar 4.52 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat

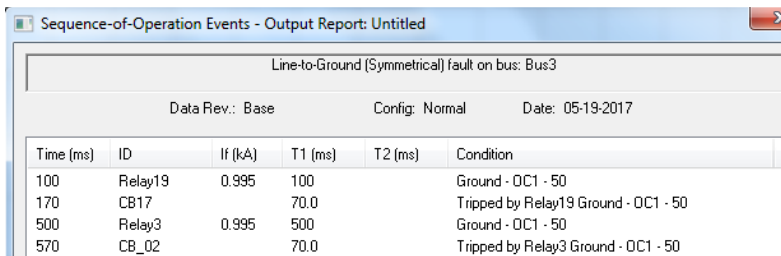
hubung singkat maksimum 0,5 cycle tiga fasa dan gangguan terletak pada bus 3, sedangkan Gambar 4.53 menunjukkan *Sequence Of Operation Event (Sequence Viewer)* atau waktu kerja pada saat hubung singkat minimum 30 cycle dua fasa dan gangguan terletak pada bus 3.



The screenshot shows a window titled "Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled". It displays a "Line-to-Ground (Symmetrical) fault on bus: Bus3". Below this, it shows "Data Rev.: Base", "Config: Normal", and "Date: 05-19-2017". The main table lists the sequence of events:

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay19	0.998	100		Ground - OC1 - 50
170	CB17		70.0		Tripped by Relay19 Ground - OC1 - 50
500	Relay3	0.998	500		Ground - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Ground - OC1 - 50

Gambar 4. 52 *Sequence Viewer 0,5 Cycle Tipikal 3*



The screenshot shows a window titled "Sequence-of-Operation Events - Output Report: Untitled". It displays a "Line-to-Ground (Symmetrical) fault on bus: Bus3". Below this, it shows "Data Rev.: Base", "Config: Normal", and "Date: 05-19-2017". The main table lists the sequence of events:

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
100	Relay19	0.995	100		Ground - OC1 - 50
170	CB17		70.0		Tripped by Relay19 Ground - OC1 - 50
500	Relay3	0.995	500		Ground - OC1 - 50
570	CB_02		70.0		Tripped by Relay3 Ground - OC1 - 50

Gambar 4. 53 *Sequence Viewer 30 Cycle Tipikal 3*

Dengan hasil perhitungan dan plot TCC di atas, maka data *resetting* tipikal 3 dapat dilihat pada Tabel 4.19.

Tabel 4. 19 *Data Resetting Rele Ground Tipikal 3*

ID Rele	Setting Existing				Setting Resetting			
	Definite Time		Instantaneous		Definite Time		Instantaneous	
55	I>	-	I>>	0,064	I>	-	I>>	0,2
	t>	-	t>>	0,5	t>	-	t>>	0,1
24	I>	0,07	I>>	-	I>	0,2	I>>	-
	t>	1,2	t>>	-	t>	0,1	t>>	-
3	I>	-	I>>	0,085	I>	-	I>>	0,017
	t>	-	t>>	1,8	t>	-	t>>	0,5

Tabel 4. 19 Data Resetting Rele Ground Tipikal 3 (lanjutan)

ID Rele	Setting Existing				Setting Resetting			
	Definite Time		Instantaneous		Definite Time		Instantaneous	
87	I>	-	I>>	0,8	I>	-	I>>	0,787 5
	t>	-	t>>	0,3	t>	-	t>>	0,1

Dari keseluruhan analisa gangguan yang terjadi pada tipikal 3 baik gangguan 0,5 *cycle line to ground* maupun 30 *cycle line to ground* dapat terlihat bahwa koordinasi dari seluruh tipikal 3 sudah benar, baik dari plot TCC hingga urutan sensing rele. Untuk mempermudah melihat urutan sensing rele pada keseluruhan tipikal 3 dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4. 20 Urutan Sensing Tipikal 3 *Ground Fault*

Letak Gangguan	Rele	0,5 Cycle		30 Cycle	
		Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele	Waktu Trip (ms)	Trip Oleh Rele
Bus 3	19	100	50	100	50
	3	300	50	300	50
Bus 9	87	100	50	100	50

4.6 Perhitungan Energi Busur Api Dengan Standar IEEE 1584-2002

Pada subbab ini akan dibahas tentang cara mendapatkan nilai arus *arc fult* secara manual sebelum menghitung besarnya insiden energi busur api. Seusai standar IEEE 1584-2002 menghitung pada level tegangan medium atau lebih dari sama dengan 1000 V menggunakan persamaan 2.12 yang telah dijelaskan pada bab 2. Setelah nilai *arcing current* didapatkan, selanjutnya mencari energi normalisasi dengan konfigurasi box dengan tipe sistem *grounded*. Untuk jarak dari titik *arcing* telah dibahas pada subbab 2.3.1. Dari hasil dua parameter yang diperoleh baru dapat menghitung besar insiden energi busur api. Gap konduktor yang digunakan pada tegangan 13,8 kV menggunakan

datasheet PLTU Paiton Unit 3 yaitu 275 mm dan tegangan 6,9 kV 200 mm.

4.6.1 Perhitungan Energi Busur Api Kondisi Existing

Pada subbab ini akan ditampilkan data hasil simulasi insiden energi busur api saat kondisi *existing*. Berikut data hasil simulasi ditunjukkan pada tabel 4.21.

Tabel 4. 21 Data Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi *Existing*

No.	ID Bus	Gap (mm)	I Bolt (kA)	FCT (cyc)	I Arc (kA)	Inc. Level (cal/ cm ²)	Energi Level
1,	SWGR – 3A	275	52,706	42,5	49,72	84,48	>Max
2,	SWGR – 3B	275	28,258	8,5	26,94	8,696	3
3	EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A	275	52,706	18,5	49,72	36,70	4
4	EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B	275	28,258	8,5	26,94	8,696	3

Tabel 4. 21 Data Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi Existing (lanjutan)

No.	ID Bus	Gap (mm)	I Bolt (kA)	FCT (cyc)	I Arc (kA)	Inc. Level (cal/cm ²)	Energi Level
5	Coal Hand Sys SWGR A	200	6,829	108,72	6,671	18,61	3
6	Coal Hand Sys SWGR B	200	6,266	113,92	6,13	17,79	3

Berikut adalah perhitungan semua bus yang dianalisis:

a. Bus SWGR – 3A

Perhitungan arus arcing (I_a) :

$$\log (I_a) = 0,00402 + 0,983 \log (I_B)$$

$$\log (I_a) = 0,00402 + 0,983 \log (52,706)$$

$$\log (I_a) = 1,697 \quad I_a = 49,77 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E_n) :

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a)+0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+1,081 \times 1,697+0,0011 \times 275}$$

$$E_n = 29,413 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 29,413 \left(\frac{0,852}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{Incident Energy} &= 355,058 \text{ J/cm}^2 \\ \text{Incident Energy} &= 355,058 \times 0,2388 \\ \text{Incident Energy} &= 84,8 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

b. Bus SWGR – 3B

$$\begin{aligned} &\text{Perhitungan arus arcing (I_a) :} \\ \log(I_a) &= 0,00402 + 0,983 \log(I_B) \\ \log(I_a) &= 0,00402 + 0,983 \log(28,258) \\ \log(I_a) &= 1,43 \quad I_a = 26,91 \text{ kA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Perhitungan Energi Normalisasi (En) :} \\ E_n &= 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G} \\ E_n &= 10^{-0,555+(-0,113)+1,081 \times 1,43+0,0011 \times 275} \\ E_n &= 15,166 \text{ J/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Perhitungan Insiden Energi (E) :} \\ \text{Incident Energy} &= 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\ \text{Incident Energy} &= 4,184 \times 1 \times 15,166 \left(\frac{0,17}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right) \\ \text{Incident Energy} &= 36,547 \text{ J/cm}^2 \\ \text{Incident Energy} &= 36,547 \times 0,2388 \\ \text{Incident Energy} &= 8,7 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

c. Bus EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A

$$\begin{aligned} &\text{Perhitungan arus arcing (I_a) :} \\ \log(I_a) &= 0,00402 + 0,983 \log(I_B) \\ \log(I_a) &= 0,00402 + 0,983 \log(52,706) \\ \log(I_a) &= 1,697 \quad I_a = 49,77 \text{ kA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Perhitungan Energi Normalisasi (En) :} \\ E_n &= 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G} \\ E_n &= 10^{-0,555+(-0,113)+1,081 \times 1,697+0,0011 \times 275} \\ E_n &= 29,413 \text{ J/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Perhitungan Insiden Energi (E) :} \\ \text{Incident Energy} &= 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\ \text{Incident Energy} &= 4,184 \times 1 \times 29,413 \left(\frac{0,37}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right) \end{aligned}$$

$$\text{Incident Energy} = 154,27 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 154,27 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 36,8 \text{ cal/cm}^2$$

d. Bus EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B

Perhitungan arus arcinng (I_a) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(28,258)$$

$$\log(I_a) = 1,43 \quad I_a = 26,91 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E_n) :

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+1,081 \times 1,43+0,0011 \times 275}$$

$$E_n = 15,166 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 15,166 \left(\frac{0,17}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 36,547 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 36,547 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 8,7 \text{ cal/cm}^2$$

e. Bus Coal Hand Sys SWGR A

Perhitungan arus arcinng (I_a) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(6,829)$$

$$\log(I_a) = 0,824 \quad I_a = 6,668 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E_n) :

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+1,081 \times 0,824+0,0011 \times 200}$$

$$E_n = 2,773 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 2,773 \left(\frac{2,174}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\begin{aligned} \text{Incident Energy} &= 85,47 \text{ J/cm}^2 \\ \text{Incident Energy} &= 85,47 \times 0,2388 \\ \text{Incident Energy} &= 20,4 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

f. Bus Coal Hand Sys SWGR B

Perhitungan arus arcing (I_a) :

$$\begin{aligned} \log(I_a) &= 0,00402 + 0,983 \log(I_B) \\ \log(I_a) &= 0,00402 + 0,983 \log(6,266) \\ \log(I_a) &= 0,787 \quad I_a = 6,123 \text{ kA} \end{aligned}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E_n) :

$$\begin{aligned} E_n &= 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G} \\ E_n &= 10^{-0,555 + (-0,113) + 1,081 \times 0,787 + 0,0011 \times 200} \\ E_n &= 2,531 \text{ J/cm}^2 \end{aligned}$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\begin{aligned} \text{Incident Energy} &= 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right)^{\left(\frac{610^x}{D^x} \right)} \\ \text{Incident Energy} &= 4,184 \times 1 \times 2,531 \left(\frac{2,278}{0,2} \right)^{\left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)} \\ \text{Incident Energy} &= 81,736 \text{ J/cm}^2 \\ \text{Incident Energy} &= 81,736 \times 0,2388 \\ \text{Incident Energy} &= 19,5 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Hasil perbandingan arus *arcing* dan insiden level perhitungan manual dengan simulasi energi busur api kondisi *existing* dapat dilihat pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Data Hasil Perbandingan Perhitungan Manual dengan Simulasi Energi Busur Api Kondisi *Existing*

No.	ID Bus	<i>Existing</i> Simulasi		<i>Existing</i> Manual	
		I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm ²)	I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm ²)
1.	SWGR – 3A	49,729	84,481	49,77	84,8

Tabel 4.22 Data Hasil Perbandingan Perhitungan Manual dengan Simulasi Energi Busur Api Kondisi Existing (lanjutan)

No.	ID Bus	<i>Existing Simulasi</i>		<i>Existing Manual</i>	
		I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm ²)	I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm ²)
2.	SW/GR – 3B	26,946	8,696	26,91	8,7
3	EP/FGD/Ash Han Sys SW/GR A	49,729	36,706	49,77	36,8
4	EP/FGD/Ash Han Sys SW/GR B	26,946	8,696	26,91	8,7
5	Coal Hand Sys SW/GR A	6,671	20,335	6,7	20,4

Tabel 4. 22 Data Hasil Perbandingan Perhitungan Manual dengan Simulasi Energi Busur Api Kondisi Existing (lanjutan)

No.	ID Bus	Existing Simulasi		Existing Manual	
		I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm ²)	I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm ²)
6	Coal Hand Sys SWGR B	6,13	19,447	6,123	19,5

4.6.2 Perhitungan Energi Busur Api Kondisi Resetting

Pada subbab ini akan ditampilkan data hasil simulasi insiden energi busur api saat kondisi *resetting*. Berikut data hasil simulasi ditunjukkan pada tabel 4.23.

Tabel 4. 23 Data Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi *Resetting*

No.	ID Bus	Gap (mm)	I Bolt (kA)	FCT (cyc)	I Arc (kA)	Inc. Level (cal/cm ²)	Energi Level
1,	SWGR – 3A	275	52,706	28,5	49,72	56,54	>Max
2,	SWGR – 3B	275	28,258	28,5	26,94	29,15	4

Tabel 4. 23 Data Hasil Simulasi Energi Busur Api Kondisi Resetting
(lanjutan)

No.	ID Bus	Gap (mm)	I Bolt (kA)	FCT (cyc)	I Arc (kA)	Inc. Level (cal/ cm ²)	Energi Level
3	EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A	275	52,706	18,5	49,72	36,70	4
4	EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B	275	28,258	18,5	26,94	18,92	3
5	Coal Hand Sys SWGR A	200	6,829	19,3	6,671	3,609	1
6	Coal Hand Sys SWGR B	200	6,266	20,92	6,13	3,57	1

Berikut adalah perhitungan semua bus yang dianalisis:

a. Bus SWGR – 3A

Perhitungan arus arcing (I_a) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(52,706)$$

$$\log(I_a) = 1,697 \quad I_a = 49,77 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E_n) :

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+1,081 \times 1,697+0,0011 \times 275}$$

$$E_n = 29,413 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 29,413 \left(\frac{0,57}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 237,656 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 237,656 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 56,8 \text{ cal/cm}^2$$

b. Bus SWGR – 3B

Perhitungan arus arcing (I_a) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(28,258)$$

$$\log(I_a) = 1,43 \quad I_a = 26,91 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E_n) :

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555+(-0,113)+1,081 \times 1,43+0,0011 \times 275}$$

$$E_n = 15,166 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 15,166 \left(\frac{0,57}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 122,54 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 122,54 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 29,3 \text{ cal/cm}^2$$

c. Bus EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A

Perhitungan arus arcinng (I_a) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(52,706)$$

$$\log(I_a) = 1,697 \quad I_a = 49,77 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E_n) :

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + (-0,113) + 1,081 \times 1,697 + 0,0011 \times 275}$$

$$E_n = 29,413 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 29,413 \left(\frac{0,37}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 154,27 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 154,27 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 36,8 \text{ cal/cm}^2$$

d. Bus EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B

Perhitungan arus arcinng (I_a) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(28,258)$$

$$\log(I_a) = 1,43 \quad I_a = 26,91 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E_n) :

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + (-0,113) + 1,081 \times 1,43 + 0,0011 \times 275}$$

$$E_n = 15,166 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 15,166 \left(\frac{0,37}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 79,54 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 79,54 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 19 \text{ cal/cm}^2$$

e. Bus Coal Hand Sys SWGR A

Perhitungan arus arcing (I_a) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(6,829)$$

$$\log(I_a) = 0,824 \quad I_a = 6,7 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E_n) :

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + (-0,113) + 1,081 \times 0,824 + 0,0011 \times 200}$$

$$E_n = 2,773 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 2,773 \left(\frac{0,386}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 15,17 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 15,17 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 3,6 \text{ cal/cm}^2$$

f. Bus Coal Hand Sys SWGR B

Perhitungan arus arcing (I_a) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(6,266)$$

$$\log(I_a) = 0,787 \quad I_a = 6,123 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (E_n) :

$$E_n = 10^{K1+K2+1,081 \log(I_a) + 0,0011 G}$$

$$E_n = 10^{-0,555 + (-0,113) + 1,081 \times 0,787 + 0,0011 \times 200}$$

$$E_n = 2,531 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$\text{Incident Energy} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 4,184 \times 1 \times 2,531 \left(\frac{0,418}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$\text{Incident Energy} = 15,006 \text{ J/cm}^2$$

$$\text{Incident Energy} = 15,006 \times 0,2388$$

$$\text{Incident Energy} = 3,6 \text{ cal/cm}^2$$

Hasil perbandingan arus *arcing* dan insiden level perhitungan manual dengan simulasi energi busur api kondisi *resetting* dapat dilihat pada Tabel 4.24.

Tabel 4.24 Data Hasil Perbandingan Perhitungan Manual dengan Simulasi Energi Busur Api Kondisi *Resetting*

No.	ID Bus	Existing Simulasi		Existing Manual	
		I Arcing (kA)	Incident Level (cm ²)cal/	I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm ²)
1.	SWGR – 3A	49,729	56,54	49,77	56,8
2.	SWGR – 3B	26,946	29,15	26,91	29,3
3	EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A	49,729	36,70	49,77	36,8
4	EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B	26,946	18,92	26,91	19

Tabel 4.24 Data Hasil Perbandingan Perhitungan Manual dengan Simulasi Energi Busur Api Kondisi Resetting (lanjutan)

No.	ID Bus	<i>Existing Simulasi</i>		<i>Existing Manual</i>	
		I Arcing (kA)	Incident Level (cm ²)cal/	I Arcing (kA)	Incident Level (cal/cm ²)
5	Coal Hand Sys SWGR A	6,671	3,609	6,7	3,6
6	Coal Hand Sys SWGR B	6.3	3,57	6.123	3,6

4.7 Perbandingan Besar Energi Busur Api Kondisi *Existing* Dengan Kondisi *Resetting*

Perbandingan besar energi busur api kondisi *existing* dengan kondisi *resetting* dapat dilihat pada Tabel 4.25 berikut:

Tabel 4.25 Perbandingan Besar Energi Busur Api Kondisi *Existing* dengan Kondisi *Resetting*

ID Bus	<i>Existing</i>			<i>Resetting</i>		
	Inc. Level Pada Simulasi (cal/cm ²)	Inc. Level Pada Perhitungan (cal/cm ²)	Energi Level Sesuai Standar NFPA 70E-2009	Inc. Level Pada Simulasi (cal/cm ²)	Inc. Level Pada Perhitungan (cal/cm ²)	Energi Level Sesuai Standar NFPA 70E-2009
SW/GR – 3A	84,481	84,8	>Max	56,54	56,8	>Max
SW/GR – 3B	8,696	8,7	3	29,15	29,3	4
EP/FGD/Ash Han Sys SW/GR A	36,706	36,8	4	36,70	36,8	4

Tabel 4.25 Perbandingan Besar Energi Busur Api Kondisi Existing dengan Kondisi Resetting (lanjutan)

ID Bus	<i>Existing</i>			<i>Resetting</i>		
	Inc. Level Pada Simulasi (cal/cm ²)	Inc. Level Pada Perhitungan (cal/cm ²)	Energi Level Sesuai Standar NFPA 70E-2009	Inc. Level Pada Simulasi (cal/cm ²)	Inc. Level Pada Perhitungan (cal/cm ²)	Energi Level Sesuai Standar NFPA 70E-2009
EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B	8,696	8,7	3	18,92	19	3
Coal Hand Sys SWGR A	20,335	20,4	3	3,609	3,6	1
Coal Hand Sys SWGR B	19,447	19,5	3	3,57	3,6	1

Dari hasil Tabel 4.25 Terlihat bahwa level insiden energi sesudah dilakukan *reseting* koordinasi proteksi ada yang menurun levelnya pada bus Coal Hand Sys SWGR A dan Coal Hand Sys SWGR B, namun pada bus SWGR – 3B level energinya naik. Hal ini dikarenakan sistem kelistrikan yang telah terkoordinasi, waktu bekerjanya rele akibat terjadinya hubung singkat juga semakin meningkat karena penambahan *grading time* terutama pada rele yang melindungi motor dari semula mempunyai *time delay* 0 detik menjadi

mempunyai *time delay* 0,2 detik karena serangkaian kerja rele mulai dari sesing hingga posisi stabil atau normal 8 *cycle* (dibualtkan 0,2 detik). Sehingga FCT (*Fault Clearing Time*) semakin meningkat dan energi busur api semakin besar.

4.8 Perhitungan Busur Api Setelah Resetting Menggunakan Rele Diferensial

Dengn menggunakan rele arus lebih gangguan fasa maupun rele arus lebih gangguan ke tanah energi busur api yang dihasilkan masih besar hingga lebih dari level 4, yang artinya tidak ada PPE (*Personal Protective Equipment*) yang dapat digunakan berdasarkan standar NFPA 70E. Untuk itu disarankan menambahkan rele diferensial agar mengurangi insiden energi busur api yang dihasilkan pada tiap bus, karena pada rele diferensial waktu kerja rele 1-3 *cycle*. Untuk hasil simulasi setelah penambahan rele diferensial dapat dilihat pada Tabel 4.26.

Tabel 426 Hasil Simulasi Energi Busur Api Setelah Penambahan Rele Diferensial di PLTU Paiton Unit 3

No.	ID Bus	Gap (mm)	I Bolt. (kA)	FCT (cyc)	I Arc. (kA)	Inc. Level (cal/cm ²)	Energi Level
1.	SWGR – 3A	275	52,706	4	49,72	8,928	3
2.	SWGR – 3B	275	28,258	6,5	26,94	6,65	2

Tabel 4.26 Hasil Simulasi Energi Busur Api Setelah Penambahan Rele Diferensial di PLTU Paiton Unit 3 (lanjutan)

No.	ID Bus	Gap (mm)	I Bolt. (kA)	FCT (cyc)	I Arc. (kA)	Inc. Level (cal/cm ²)	Energi Level
3	EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A	275	52,706	4	49,72	78,92 ₈	3
4	EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B	275	28,258	6,5	26,94	6,65	2
5	Coal Hand Sys SWGR A	200	6,829	4	6,671	0,842	0
6	Coal Hand Sys SWGR B	200	6,266	6,5	6,13	1,110	0

Berikut adalah perhitungan semua bus yang dianalisis:

a. Bus SWGR – 3A

Perhitungan arus arcing (I_a) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(52,706)$$

$$\log(I_a) = 1,697 \quad I_a = 49,77 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (En) :

$$En = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$En = 10^{-0,555+(-0,113)+1,081 \times 1,697+0,0011 \times 275}$$

$$En = 29,413 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 C_f En \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 \times 1 \times 29,413 \left(\frac{0,09}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 37,525 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 37,525 \times 0,2388$$

$$Incident \text{ Energy} = 9 \text{ cal/cm}^2$$

b. Bus SWGR – 3B

Perhitungan arus arcing (Ia) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(28,258)$$

$$\log(I_a) = 1,43 \quad I_a = 26,91 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (En) :

$$En = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$En = 10^{-0,555+(-0,113)+1,081 \times 1,43+0,0011 \times 275}$$

$$En = 15,166 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 C_f En \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 \times 1 \times 15,166 \left(\frac{0,13}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 27,948 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 27,948 \times 0,2388$$

$$Incident \text{ Energy} = 6,7 \text{ cal/cm}^2$$

c. Bus EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A

Perhitungan arus arcing (Ia) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(52,706)$$

$$\log(I_a) = 1,697 \quad I_a = 49,77 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (En) :

$$En = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$En = 10^{-0,555 + (-0,113) + 1,081 \times 1,697 + 0,0011 \times 275}$$

$$En = 29,413 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 C_f En \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 \times 1 \times 29,413 \left(\frac{0,9}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 37,52 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 37,52 \times 0,2388$$

$$Incident \text{ Energy} = 9 \text{ cal/cm}^2$$

d. Bus EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B

Perhitungan arus arcing (Ia) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(28,258)$$

$$\log(I_a) = 1,43 \quad I_a = 26,91 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (En) :

$$En = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$En = 10^{-0,555 + (-0,113) + 1,081 \times 1,43 + 0,0011 \times 275}$$

$$En = 15,166 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 C_f En \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 \times 1 \times 15,166 \left(\frac{0,13}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 27,94 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 27,94 \times 0,2388$$

$$Incident \text{ Energy} = 6,7 \text{ cal/cm}^2$$

e. Bus Coal Hand Sys SWGR A

Perhitungan arus arcing (Ia) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(6,829)$$

$$\log(I_a) = 0,824 \quad I_a = 6,7 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (En) :

$$En = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$En = 10^{-0,555+(-0,113)+1,081 \times 0,824 + 0,0011 \times 200}$$

$$En = 2,773 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 C_f En \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 \times 1 \times 2,773 \left(\frac{0,09}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 3,538 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 3,538 \times 0,2388$$

$$Incident \text{ Energy} = 0,8 \text{ cal/cm}^2$$

f. **Bus Coal Hand Sys SWGR B**

Perhitungan arus arcinng (Ia) :

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(I_B)$$

$$\log(I_a) = 0,00402 + 0,983 \log(6,266)$$

$$\log(I_a) = 0,787 \quad I_a = 6,123 \text{ kA}$$

Perhitungan Energi Normalisasi (En) :

$$En = 10^{K1+K2+1,081 \log(Ia) + 0,0011 G}$$

$$En = 10^{-0,555+(-0,113)+1,081 \times 0,787 + 0,0011 \times 200}$$

$$En = 2,531 \text{ J/cm}^2$$

Perhitungan Insiden Energi (E) :

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 C_f En \left(\frac{t}{0,2}\right) \left(\frac{610^x}{D^x}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,184 \times 1 \times 2,531 \left(\frac{0,13}{0,2}\right) \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}}\right)$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,664 \text{ J/cm}^2$$

$$Incident \text{ Energy} = 4,664 \times 0,2388$$

$$Incident \text{ Energy} = 1,1 \text{ cal/cm}^2$$

Hasil perbandingan setting busur api pada kondisi resetting sebelum dan sesudah menggunakan rele diferensial dapat dilihat pada Tabel 4.27 berikut.

Tabel 4.27 Hasil Setting Busur Api Setelah Penambahan Rele Diferensial Pada PLTU Paiton Unit 3

ID Bus	Sebelum Menggunakan Rele Diferensial			Setelah Menggunakan Rele Diferensial		
	Inc. Level Pada Simulasi (cal/cm ²)	Inc. Level Pada Perhitungan (cal/cm ²)	Energi Level Sesuai Standar NFPA 70E-2009	Inc. Level Pada Simulasi (cal/cm ²)	Inc. Level Pada Perhitungan (cal/cm ²)	Energi Level Sesuai Standar NFPA 70E-2009
SWGR – 3A	56,54	56,8	>Max	8,928	9	3
SWGR – 3B	29,15	29,3	4	6,65	6,7	2
EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A	36,70	36,8	4	78,928	9	3
EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B	18,92	19	3	6,65	6,7	2

Tabel 4.27 Hasil Setting Busur Api Setelah Penambahan Rele Diferensial Pada PLTU Paiton Unit 3 (lanjutan)

ID Bus	Sebelum Menggunakan Rele Diferensial			Setelah Menggunakan Rele Diferensial		
	Inc. Level Pada Simulasi (cal/cm ²)	Inc. Level Pada Perhitungan (cal/cm ²)	Energi Level Sesuai Standar NFPA 70E-2009	Inc. Level Pada Simulasi (cal/cm ²)	Inc. Level Pada Perhitungan (cal/cm ²)	Energi Level Sesuai Standar NFPA 70E-2009
Coal Hand Sys SWGR A	3,609	3,6	1	0,842	0,8	0
Coal Hand Sys SWGR B	3,57	3,6	1	1,110	1,1	0

Dari Tabel 4.27 dapat dilihat bahwa nilai insiden energi busur api setelah ditambahkan rele diferensial menurun pada setiap bus. Hal ini dikarenakan rele diferensial bekerja sangat cepat sehingga akan mempengaruhi salah satu faktor yang berpengaruh terhadap besarnya insiden energi busur api yaitu FCT (*Fault Clearing Time*). Semakin cepat pemutusan, semakin kecil energi busur api yang dihasilkan.

4.9 Perhitungan *Flash Protection Boundary* (FPB)

Pada insiden energi busur api terdapat jarak batas dimana pada batas jarak aman pekerja dari titik yang berpotensi terjadinya busur api. Jarak aman pekerja ini adalah jarak aman dimana pekerja berada pada titik sejauh sekian meter dimana jika terjadi busur api, pekerja tersebut tetap aman walau tanpa mengenakan PPE yang dapat dihitung sesuai standar IEEE 1584-2002 dan telah dijelaskan pada subbab 2.3.2, tetapi

ketika melewati batasan ini seseorang diwajibkan untuk memakai alat perlindungan diri yang sesuai. Semakin besar energinya maka semakin jauh pula jarak amannya.

4.9.1 Perhitungan *Flash Protection Boundary* (FPB) Kondisi *Existing*

Pada subbab ini akan dibahas mengenai perhitungan *flash protection boundary* tiap bus pada insiden energi busur api kondisi *existing*. Berikut adalah perhitungannya :

a. Bus SWGR – 3A

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 29,413 \left(\frac{0,852}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 72735,07 \text{ mm} = 72,735 \text{ m}$$

b. Bus SWGR – 3B

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 15,166 \left(\frac{0,17}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 7029,016 \text{ mm} = 7,029 \text{ m}$$

c. Bus EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 29,413 \left(\frac{0,37}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 30879,784 \text{ mm} = 30,879 \text{ m}$$

d. Bus EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 15,166 \left(\frac{0,17}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 7029,016 \text{ mm} = 7,029 \text{ m}$$

e. **Bus Coal Hand Sys SWGR A**

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 2,773 \left(\frac{2,174}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 16830,394 \text{ mm} = 16,83 \text{ m}$$

f. **Bus Coal Hand Sys SWGR B**

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 2,531 \left(\frac{2,278}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 16075,183 \text{ mm} = 16,075 \text{ m}$$

4.9.2 ***Perhitungan Flash Protection Boundary (FPB) Kondisi Resetting***

Pada subbab ini akan dibahas mengenai perhitungan *flash protection boundary* tiap bus pada insiden energi busur api kondisi *resetting*. Berikut adalah perhitungannya :

a. **Bus SWGR – 3A**

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 29,413 \left(\frac{0,57}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 48145,441 \text{ mm} = 48,145 \text{ m}$$

b. **Bus SWGR – 3B**

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 15,166 \left(\frac{0,57}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 24372,532 \text{ mm} = 24,373 \text{ m}$$

c. **Bus EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A**

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 29,413 \left(\frac{0,37}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 30879,784 \text{ mm} = 30,88 \text{ m}$$

d. Bus EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 15,166 \left(\frac{0,37}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 15632,187 \text{ mm} = 15,632 \text{ m}$$

e. Bus Coal Hand Sys SWGR A

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 2,773 \left(\frac{0,386}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 2847,327 \text{ mm} = 2,847 \text{ m}$$

f. Bus Coal Hand Sys SWGR B

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 2,531 \left(\frac{0,418}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 2815,726 \text{ mm} = 2,816 \text{ m}$$

Nilai FPB akan dibandingkan ketika kondisi *eksisting* dan kondisi *resetting*. Data-data tersebut akan ditampilkan pada Tabel 4.28.

Tabel 4.28 Data Perbandingan FPB Kondisi *Eksisting* dan *Resetting*

ID Bus	FPB Eksisting(m)		FPB Resetting (m)	
	Manual	Simulasi	Manual	Simulasi
SWGR-3A	72,735	72,43	48,145	47,95
SWGR-3B	7,029	7	24,373	24,26
EP/FGD/A sh Han Sys SWGR A	30,879	30,75	30,88	30,75
EP/FGD/A sh Han Sys SWGR B	7,029	7	15,632	15,58
Coal Hand Sys SWGR A	16,83	16,76	2,847	2,83
Coal Hand Sys SWGR B	16,075	16,01	2,816	2,8

Pada Tabel 4.28 terlihat jelas batas jarak aman pekerja saat kondisi *existing* dengan kondisi *resetting* yang diperoleh saat kondisi

resetting masih sangat jauh. Hal ini disebabkan insiden energi busur apinya besar yaitu lebih dari level 4 atau lebih dari 40 cal/cm².

4.10 Perhitungan Flash Protection Boundary Dengan Menggunakan Rele Diferensial

Besarnya insiden energi busur api setelah *resetting* masih lebih dari level 4, maka jarak aman pekerja juga masih jauh. Sebab FPB tergantung dari besar energi yang dihasilkan, semakin besar energinya maka semakin jauh pula jarak amannya, demikian sebaliknya. Oleh karena itu disarankan menambah rele diferensial yang memiliki waktu kerja yang sangat cepat 1-3 *cycle*. Berikut adalah perhitungannya :

a. Bus SWGR – 3A

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 29,413 \left(\frac{0,09}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 7222,344 \text{ mm} = 7,222 \text{ m}$$

b. Bus SWGR – 3B

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 15,166 \left(\frac{0,13}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 5335,266 \text{ mm} = 5,335 \text{ m}$$

c. Bus EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 29,413 \left(\frac{0,09}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 7222,344 \text{ mm} = 7,222 \text{ m}$$

d. Bus EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 15,166 \left(\frac{0,13}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 5335,266 \text{ mm} = 5,335 \text{ m}$$

e. **Bus Coal Hand Sys SWGR A**

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 2,773 \left(\frac{0,09}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 637,732 \text{ mm} = 0,638 \text{ m}$$

f. **Bus Coal Hand Sys SWGR B**

$$D_B = \left[4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[4,184 \times 1 \times 2,531 \left(\frac{0,13}{0,2} \right) \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 847,153 \text{ mm} = 0,847 \text{ m}$$

Hasil *setting Flash Protection Boundary* pada kondisi sebelum dan sesudah menggunakan rele diferensial dapat dilihat pada Tabel 4.29.

Tabel 4.29 Hasil Setting Flash Protection Boundary Setelah Menggunakan Rele Diferensial

ID Bus	Sebelum Menggunakan Rele Diferensial		Sesudah Menggunakan Rele Diferensial	
	Hasil Simulasi <i>Flash Protection Boundary</i>	Hasil Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i>	Hasil Simulasi <i>Flash Protection Boundary</i>	Hasil Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i>
SWGR – 3A	47,95	48,145	7,19	7,222
SWGR – 3B	24,26	24,373	5,31	5,335

Tabel 4.29 Hasil Setting Flash Protection Boundary Setelah Menggunakan Rele Diferensial (lanjutan)

ID Bus	Sebelum Menggunakan Rele Diferensial		Sesudah Menggunakan Rele Diferensial	
	Hasil Simulasi <i>Flash Protection Boundary</i>	Hasil Perhitungan <i>n Flash Protection Boundary</i>	Hasil Simulasi <i>Flash Protection Boundary</i>	Hasil Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i>
EP/FGD/As h Han Sys SWGR A	30,75	30,88	7,19	7,222
EP/FGD/As h Han Sys SWGR B	15,58	15,632	5,31	5,335
Coal Hand Sys SWGR A	2,83	2,847	0,63	0,638
Coal Hand Sys SWGR B	2,8	2,816	0,84	0,847

Dari Tabel 4.29 di atas dapat dilihat jarak aman pekerja ke titik yang berpotensi terjadinya busur api semakin pendek. Hal ini disebabkan penambahan rele diferensial yang pemutusannya sangat

cepat. Waktu kerja rele yang cepat menurunkan besar insiden busur api, karena salah satu faktor yang berpengaruh terhadap besar energi adalah waktu. Semakin cepat waktu pemutusan, semakin kecil energi yang dihasilkan



4.11 Personal Protective Equipment (PPE) yang Harus Digunakan

Personal Protective Equipment (PPE) dalam istilah Bahasa Indonesia adalah APD (Alat Pelindung Diri) merupakan alat yang dapat melindungi diri saat bekerja pada daerah yang beresiko terkena busur api. Berdasarkan hasil analisa busur api yang dilakukan untuk kondisi setelah *resetting* diperoleh nilai insiden energi busur api, maka dapat dikategorikan level insiden tersebut sesuai standar NFPA 70E-2009 dan PPE yang harus dipakai sesuai level insiden busur api. Jenis PPE pada tiap bus yang dianalisa dapat dilihat pada Tabel 4.30.



Tabel 4. 30 Jenis PPE Berdasarkan Kategori Busur Api Kondisi *Resetting*

ID Bus	Kat	Perlengkapan Alat Pelindung Diri	Pakaian Yang Digunakan
SWGR – 3A	3	<ul style="list-style-type: none">• Flash Suit Hood• Pelindung Wajah dan Kepala• Pakaian Tahan Api• Pelindung Mata• Pelindung Telinga• Celana Panjang	


Tabel 4. 30 Jenis PPE Berdasarkan Kategori Busur Api Kondisi *Resetting* (lanjutan)

ID Bus	Kat	Perlengkapan Alat Pelindung Diri	Pakaian Yang Digunakan
SWGR – 3B	2	<ul style="list-style-type: none"> • Pelindung Wajah dan Kepala • Pakaian Tahan Api • Pelindung Mata • Pelindung Telinga • Celana Panjang 	
EP/FGD/Ash Han Sys SWGR A	3	<ul style="list-style-type: none"> • Flash Suit Hood • Pelindung Wajah dan Kepala • Pakaian Tahan Api • Pelindung Mata • Pelindung Telinga • Celana Panjang 	

Tabel 4. 30 Jenis PPE Berdasarkan Kategori Busur Api Kondisi *Resetting* (lanjutan)

ID Bus	Kat	Perlengkapan Alat Pelindung Diri	Pakaian Yang Digunakan
EP/FGD/Ash Han Sys SWGR B	2	<ul style="list-style-type: none"> • Pelindung Wajah dan Kepala • Pakaian Tahan Api • Pelindung Mata • Pelindung Telinga • Celana Panjang 	
Coal Hand Sys SWGR A	0	<ul style="list-style-type: none"> • Pelindung Mata • Pelindung Telinga • Kemeja Lengan Panjang • Celana Panjang 	

Tabel 4. 30 Jenis PPE Berdasarkan Kategori Busur Api Kondisi *Resetting* (lanjutan)

ID Bus	Kat	Perlengkapan Alat Pelindung Diri	Pakaian Yang Digunakan
Coal Hand Sys SWGR B	0	<ul style="list-style-type: none"> • Pelindung Mata • Pelindung Telinga • Kemeja Lengan Panjang • Celana Panjang 	

Dampak kerusakan yang diakibatkan dari busur api sangat membahayakan bagi pekerja dan dapat merusak peralatan. Oleh sebab itu bahaya busur api yang ditimbulkan, selain menggunakan PPE juga harus diberikan peringatan agar setiap orang yang mendekati peralatan bertegangan yang memiliki bahaya busur api tersebut bisa lebih berhati-hati. Dan diberi label peringatan agar setiap orang tahu bahaya busur api yang akan ditimbulkan tergolong kategori energinya. Untuk pelabelan tiap bus dapat dilihat pada Tabel 4.31.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi koordinasi proteksi dan busur api pada sistem kelistrikan di PLTU Paiton Unit 3, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Besarnya arus hubung singkat maksimal yang digunakan adalah arus kontribusi saat 4 *cycle* untuk menentukan batas minimal kelengkungan kurva rele, sedangkan untuk arus hubung singkat minimum yang digunakan adalah arus hubung singkat yang terletak pada bus yang berada di dekat rele, sebab saat hubung singkat minimum adalah saat *steady state* atau 30 *cycle*, sehingga tidak ada arus kontribusi yang mengalir.
2. Hasil plot kurva arus lebih gangguan fasa dan gangguan ke tanah waktu rele pengaman untuk kondisi *existing* menunjukkan bahwa koordinasi rele salah, dapat terlihat dari *time delay* yang tidak sesuai dengan standar IEEE 242, *grading time* dari kurva satu dengan kurva lain tidak sesuai standar, kurva *invers* rele yang menyinggung kurva starting motor, dan kurva rele pengaman yang menyinggung *damage curve* transformator, sehingga perlu dilakukan *resetting*.
3. Setelah melakukan *resetting* koordinasi proteksi, baik untuk gangguan fasa atau gangguan ke tanah, nilai insiden energi busur api dan nilai *Flash Protection Boundary* (FPB) masih bernilai lebih dari level 4 ($>40 \text{ cal/cm}^2$) pada bus SWGR 3A sehingga belum bisa menentukan PPE sesuai NFPA 70E-2009. Namun setelah penambahan rele diferensial besar nilai insiden energi busur api dan nilai *Flash Protection Boundary* (FPB) menurun hingga besarnya level *arc flash* hanya level 3 ($8,1 - 25 \text{ cal/cm}^2$), level 2 ($4,1 - 8 \text{ cal/cm}^2$), dan level 0 ($0 - 1,2 \text{ cal/cm}^2$), oleh karena itu PPE dapat ditentukan sesuai level *arc flash* tiap bus sesuai NFPA 70E-2009.

5.2 Saran

1. Untuk PLTU Paiton Unit 3 disarankan untuk melakukan *resetting* pada rele arus lebih fasa dan ground agar kategori bahaya *arc flash*nya tidak melebihi batas yang diijinkan.

2. Untuk pekerja pada PLTU Paiton Unit 3 disarankan menggunakan *personal protective equipment* (PPE) yang sesuai dengan kategori *arc flash*nya untuk melindungi pekerja dari dampak negatif bahaya *arc flash* jika terjadi hubung singkat.
3. Untuk studi selanjutnya dapat dilakukan analisa busur api pada sistem tegangan rendah yang terdapat pada PLTU Paiton Unit 3, agar setiap daerah dapat diketahui besar insiden energinya serta alat perlindungan diri yang sesuai bagi pekerja.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Merdensyah, A., “Studi Perencanaan Koordinasi”, FT UI, 2008
<[http://lib.ui.ac.id/file?file=digital/124057-R030814-Studi%20perencanaan Literatur.pdf](http://lib.ui.ac.id/file?file=digital/124057-R030814-Studi%20perencanaan%20Literatur.pdf)>, 15 April 2017
- [2] R Wahyudi, Ir, *Diktat Kuliah Sistem Pengaman Tenaga Listrik*, 2008.
- [3] Ontoseno Penangsang. Prof, *Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga* 2, 2008.
- [4] Lazar. Irwin , “*Electrical System Analysis and Design for Industrial Plants*”, McGraw-Hill, Inc., USA, Ch.1, Ch.4, 1980.
- [5] Simms, J., Johnson, G., “*Protective Relaying Methods for Reducing Arc Flash Energy*”, IEEE Transaction On Industry Applications, Vol. 49, No. 2, pp 803, April, 2013
- [6] Jones, Ray. A, “*Safety BASICS™ Handbook for Electrical Safety Edition 2*”, Cooper Bussman, Inc., USA, 2004.
- [7] Wu, Alex Y., “*Modified Medium Voltage Arc Flash Incident Energy Calculation Method*”, IEEE Transaction on Industry Application, USA, 2008.
- [8] IEEE Std 1584™ – 2002, “*IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculation*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2002.
- [9] Keller, Kimberley, “*Electrical Safety Code Manual*”, Elsevier, Inc., USA, Ch. 7, 2010.
- [10] NFPA 70E., “*Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces 2009 Edition*”, NFPA 70E-2009.
- [11] IEEE Std 242-2001™, “*IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 15, 2001

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BIODATA PENULIS



Nama : Vania Aprilia Ukhti
TTL : Madiun, 5 April 1994
Kelamin : Perempuan
Agama : Islam
Alamat : Jl. Soekarno Hatta 329 Ponorogo
Telp/HP : 082228542006
Email : vaniaaaukhti@gmail.com

RIWAYAT PENDIDIKAN

1. 2000 – 2006 : SD Ma'arif Ponorogo
2. 2006 – 2009 : SMP Negeri 1 Ponorogo
3. 2009 – 2012 : SMA Negeri 1 Ponorogo
4. 2012 – 2015 : D3 Teknik Elektro Universitas Negeri Malang
5. 2015 - 2017 : S1 Teknik Elektro bidang studi Sistem Tenaga ITS

PENGALAMAN KERJA

1. Kerja Praktek di PT. PJB UP BRANTAS DISTRIK A PLTA Sengguruh, Malang, 2014 (selama 2 bulan)
2. Kerja Praktek di PT. IPMOMI PLTU Paiton Unit 3, Paiton, Probolinggo, 2016 (selama 1,5 bulan)

PENGALAMAN ORGANISASI

1. Asisten Laboratorium Penggunaan Komputer Dalam Sistem Tenaga Listrik di Universitas Negeri Malang, periode 2014-2015
2. Divisi kestaris Piala Rektor Sepuluh Nopember 2016 Bola Voli

---Halaman ini sengaja dikosongkan---